

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**THIAGO TAKUMI TAN**

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS PARA ESTUDO DE FRATURA  
INTERLAMINAR MODO-I E MODO-II DE MATERIAIS DISSIMILARES**

**CAMPINA GRANDE  
2017**

**THIAGO TAKUMI TAN**

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS PARA ESTUDO DE  
FRATURA INTERLAMINAR MODO-I E MODO-II DE MATERIAIS  
DISSIMILARES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação - Stricto Sensu - Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**LINHA DE PESQUISA:** Análise e Projeto de Sistemas Termomecânicos

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

Campina Grande, PB

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

T161d

Tan, Thiago Takumi.

Desenvolvimento de dispositivos para estudo de fratura interlaminar modo-I e modo-II de materiais dissimilares / Thiago Takumi Tan. – Campina Grande, 2017.  
140 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2017.

"Orientação: Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior".

Referências.

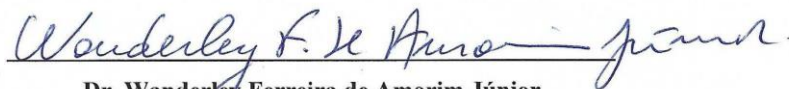
1. Double Cantilever Beam. 2. DCB. 3. End-loaded Split. 4. ELS. 5. Junta Adesiva. I. Amorim Júnior, Wanderley Ferreira de. II. Título.

CDU 620.1(043)

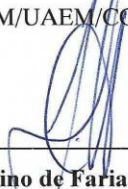
“DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA ESTUDO DE FRATURA  
INTERLAMINAR EM MODO I E MODO II DE MATERIAIS DISSIMILARES”.

**THIAGO TAKUMI TAN**

Dissertação Aprovada em 13/03/2017 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes  
membros:



**Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior**  
Orientador  
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



**Dr. Juscelino de Farias Maribondo**  
Examinador Interno  
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



**Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire Júnior**  
Examinador Externo  
PPGEM/UFRN



Em Memória de minha Mãe Verônica e de meu Primo Wellington.

### **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a DEUS por estar sempre me ajudando e capacitando para os desafios da vida.

Agradeço a minha Vó Marlene por ter ajudado em minha formação pessoal, por ser uma vencedora, por ser um exemplo de honestidade, simplicidade e humanidade, e mesmo sem ter formação colegial ela incentivou os filhos e os netos a perseverarem nos estudos e construírem suas vidas com dignidade.

Agradeço a minha esposa Aline por estar ao meu lado sempre que preciso, pelo apoio, compreensão, motivação, e por fazer parte da minha vida, e buscando fazer a vontade de DEUS.

Agradeço ao meu Pai João Tan pelo incentivo, pelos conselhos pessoais e profissionais, e por ser o exemplo que eu tenho procurado seguir.

Agradeço a minha Família pelo apoio que sempre tem dado, por ter apoiado em minhas decisões, por poder contar com cada um em todos os momentos.

Agradeço ao Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Junior pelos conselhos e orientação para o desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço ao Prof. Msc. Leonardo Pereira pelo auxílio na fabricação dos protótipos.

Agradeço a Francisco Procópio pela ajuda com os testes dos protótipos.

Grato.

Thiago Takumi Tan

TAN, Thiago Takumi. DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS PARA ESTUDO DE FRATURA INTERLAMINAR MODO-I E MODO-II DE MATERIAIS DISSIMILARES. 2017. 140 f. Dissertação (Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2017.

## RESUMO

O objetivo desta dissertação foi desenvolver dispositivos que possam ser utilizados para ensaios de fratura interlaminar modo-I e modo-II em materiais dissimilares, para aplicação de cargas dinâmicas. Para o desenvolvimento dos dispositivos foi utilizada uma adaptação da metodologia de projeto apresentada por Maribondo (2000), que consiste em projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar, projeto detalhado, fabricação e testes. A escolha dos ensaios que podem ser utilizados para obter tais modos de fratura foi realizada com base no estudo de trabalhos acadêmicos, que apontou o ensaio *double cantilever beam* (DCB), como sendo o mais utilizado para estudo de fratura interlaminar modo-I, e também foi observado o crescimento do uso do ensaio *end-loaded split* (ELS), para estudo de fratura interlaminar modo-II. Os dispositivos desenvolvidos foram testados em uma máquina de impacto por queda de peso, onde foram utilizados corpos de prova de junta adesiva de alumínio/epóxi. Realizaram-se testes modo-I e modo-II bem-sucedidos, analisando o comportamento dos dispositivos e dos corpos de prova durante o ensaio e após o mesmo.

**Palavras-chave:** Double cantilever beam. DCB. End-loaded split. ELS. Junta adesiva.

## **ABSTRACT**

The main objective of this dissertation for the devices that can be used for mode-I and mode-II interlaminar fracture test in dissimilar materials. For the development of devices for design methodology that projects in informational design, conceptual design, preliminary design, detailed design, fabrication and testing. The choice of the tests that can be used to obtain such fracture modes was made based on the study of academic papers, which pointed to the double beam cantilever (DCB) test, as being the most used for the study of interlaminar mode-I, and end-loaded split (ELS) for the study of mode-II interlaminar fracture. The developed devices were tested in a weight drop impact machine, where aluminum / epoxy adhesive joints were used. Testing and analysis of the behavior of the devices and test bodies were carried out during and after the test.

**Key-words:** Double cantilever beam. DCB. End-loaded split. ELS. Adhesive joint.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Os tipos de fratura interlaminar modo-I, modo-II e modo-III.....  | 17 |
| Figura 2 - Corpo de prova DCB a) com dobradiça; b) com bloco de carga.....   | 18 |
| Figura 3 - Montagem de um corpo de prova DCB à máquina de ensaio de tração, utilizando dobradiças.....                   | 19 |
| Figura 4 - Montagem de um corpo de prova DCB utilizada na dissertação de Cook (2001).....                                | 19 |
| Figura 5 – Configuração de ensaio DCB com bloco de carga utilizado por Prombut (2006).....                               | 20 |
| Figura 6 - Configuração de ensaio DCB com bloco de carga utilizado por Wood (2007).....                                  | 21 |
| Figura 7 - Configuração de ensaio DCB com bloco de carga utilizado por Hintikka, Wallin e Saarela (2010).....            | 21 |
| Figura 8 – Configuração de ensaio DCB com bloco de carga utilizado por Ilyas (2010).....                                 | 22 |
| Figura 9 - Configuração de ensaio DCB com bloco de carga utilizado por Mohan, Ivanković e Murphy (2013).....             | 22 |
| Figura 10 – Configuração de ensaio DCB com bloco de carga utilizado por Shedden (2013).....                              | 23 |
| Figura 11 – Configuração experimental do ensaio de fratura “wedge-impact”.....   | 24 |
| Figura 12 – Imagem dos corpos de prova após o ensaio de fratura “wedge-impact”.....                                      | 24 |
| Figura 13 – Esquema de montagem do dispositivo “impact-wedge peel”.....  | 26 |
| Figura 14 – Esquema de um corpo de prova “impact-wedge peel”.....  | 26 |
| Figura 15 – Conceito de um dispositivo de fratura interlaminar desenvolvido na Universidade de Aalborg.....              | 27 |
| Figura 16 – Configuração para teste modo-I desenvolvida na Universidade de Aalborg.....                                  | 29 |
| Figura 17 - Máquina montada na configuração “Falling wedge” para o ensaio DCB dinâmico.....                              | 30 |
| Figura 18 - Esquema do dispositivo para ensaio DCB dinâmico tipo “Falling wedge”.....                                    | 31 |
| Figura 19 - Configuração experimental do teste DCB dinâmico tipo “Falling wedge”.....                                    | 31 |
| Figura 20 - Esquema da torre para ensaio modo-I DCB dinâmico.....  | 33 |
| Figura 21 - Garfos de ataque.....  | 33 |
| Figura 22 - Corpo de prova modo-I DCB no dispositivo dinâmico com os garfos de ataque visíveis.....                      | 34 |
| Figura 23 - Amostra testado pelo dispositivo de ensaio DCB dinâmico.....   | 34 |
| Figura 24 - Dispositivo ELS utilizado por Mohan, Ivanković e Murphy (2013).....  | 35 |
| Figura 25 - Dispositivo ELS utilizado no EMPA.....   | 36 |
| Figura 26 - Dispositivo ELS utilizado por Blackman, Brunner e Williams (2006).....                                       | 36 |
| Figura 27 - Configuração de teste ELS dinâmico da Virginia Tech.....   | 37 |
| Figura 28 - Montagem do dispositivo ELS modificado.....  | 38 |
| Figura 29 - Esquema do dispositivo ELS modificado dinâmico.....  | 39 |
| Figura 30 - Fluxograma da metodologia de projeto adotada no trabalho.....  | 40 |
| Figura 31- Imagem da tela do programa utilizado VLC media player.....  | 42 |
| Figura 32 – Imagem dos corpos de prova DCB fabricados.....   | 43 |
| Figura 33 - Esquema dos modos de fratura interlaminar e os tipos de ensaios encontrados no banco de dados levantado..... | 44 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 34 – Quantidade de trabalhos acadêmicos encontrados no banco de dados que abordam os ensaios de fratura interlaminar modo I, modo II e modo misto. .... | 45 |
| Figura 35 – Garras para ensaio de fratura desenvolvida por Tessaro (2016) .....  | 46 |
| Figura 36 – Gráfico da tenacidade à fratura modo-I versus comprimento da trinca. .   | 46 |
| Figura 37 – Princípios de solução dos subsistemas de transmissão de carga (a) TC_D1, (b) TC_D2 e (c) TC_D3.....  | 48 |
| Figura 38 - Princípio de solução do subsistema alinhamento (AL_D1) .....   | 49 |
| Figura 39 - Princípio de solução do subsistema fixação do corpo de prova DCB (FCP_D1) .....  | 49 |
| Figura 40 - Princípio de solução do subsistema fixação do corpo de prova DCB 2 (FCP_D2) .....  | 50 |
| Figura 41 - Princípio de solução do subsistema base de fixação 1 (BF_D1) .....   | 50 |
| Figura 42 - Configuração do subsistema aplicação de carga 1 (AC_D1) .....  | 51 |
| Figura 43 - Princípio de solução do subsistema aplicação de carga 2 (AC_D2) .....  | 51 |
| Figura 44 – Princípios de solução do dispositivo DCB, separado em (a) torre DCB; (b) impactador; (c) e dispositivo DCB .....                                   | 53 |
| Figura 45 - Princípios de solução do subsistema transmissão de carga (a) TC_E1 e (b) TC_E2.....  | 54 |
| Figura 46 - Princípios de solução do subsistema alinhamento horizontal (a) AH_E1, (b) AH_E2, (c) AH_E3 e (d) AH_E4. ....                                       | 55 |
| Figura 47 - Princípios de solução do subsistema eixo guia horizontal (a) EG_E1, (b) EG_E2 e (c) EG_E3. ....  | 56 |
| Figura 48 - Princípio de solução do subsistema Alinhamento vertical 1 (AV_E1) .....  | 57 |
| Figura 49 - Princípios de solução do subsistema alojamento (a) AL_E1, (b) AL_E2 e (c) AL_E3. ....  | 58 |
| Figura 50 - Princípios de solução do subsistema fixação do corpo de prova ELS (a) FCP_E1, (b) FCP_E2 e (c) FCP_E3 .....  | 59 |
| Figura 51 - Princípios de solução do subsistema suporte de ligação (1) SL_E1, (b) SL_E2, (c) SL_E3 e (d) SL_E4.....  | 60 |
| Figura 52 - Princípio de solução do subsistema estrutural ELS 1 (EST_E1) .....   | 60 |
| Figura 53 - Princípios de solução do subsistema aplicação de carga ELS (a) AC_E1 e (b) AC_E2.....  | 61 |
| Figura 54 - Princípio de solução do subsistema placa base 1 (PB_E1) .....  | 62 |
| Figura 55 – Vista em perspectiva do dispositivo ELS, com os princípios de solução escolhidos. ....   | 65 |
| Figura 56 – Protótipo funcional do subsistema aplicação de carga 2 (AP_D2) .....   | 66 |
| Figura 57 – Protótipo funcional do subsistema alinhamento 1 (AL_D1) .....  | 67 |
| Figura 58 – Montagem do protótipo funcional do dispositivo DCB dinâmico.....   | 68 |
| Figura 59 – Protótipo funcional do dispositivo DCB durante a simulação de ensaio.....  | 68 |
| Figura 60 – Subsistema alojamento 1, antes e após a montagem.....  | 69 |
| Figura 61 – Protótipo funcional do dispositivo alinhamento horizontal (AH_E2) .....  | 70 |
| Figura 62 – Dispositivo ELS dinâmico montado à estrutura da máquina de impacto.....  | 71 |
| Figura 63 – Simulação de ensaio sobre o protótipo funcional ELS nos momentos anterior, durante e após o impacto sobre os corpos de prova .....                 | 71 |
| Figura 64 – Detalhe do protótipo funcional ELS dinâmico interrompendo a visão do corpo de prova .....  | 72 |
| Figura 65 - Vista em perspectiva do novo dispositivo ELS dinâmico, com os novos princípios de solução escolhidos.....  | 74 |
| Figura 66 – Distribuição de tensão no conjunto impactador DCB .....  | 75 |
| Figura 67 – Distribuição de tensão sobre o conjunto torre DCB.....   | 75 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 68 – Distribuição de tensão sobre o bloco de carga e o pino superior que compõem o subsistema FCP_D2, e tensão máxima de 29,41 e 25,03 MPa, respectivamente. ....         | 76 |
| Figura 69 - Distribuição de tensão sobre o bloco de carga e o pino de carga superior que compõem o subsistema TC_D1, e tensão máxima de 44,09 e 98,71 MPa, respectivamente. .... | 76 |
| Figura 70 – Distribuição de tensão sobre os subsistemas AL_D1 e BF_D1, e tensão máxima de 14,56 e 2,02 MPa.....  | 77 |
| Figura 71 – Esquema do ensaio ELS com (a) uma força aplicada na extremidade, e (b) o equivalente com força no engaste e momento de resistência aplicados. ....                   | 78 |
| Figura 72 – (a) Vista lateral e em (b) perspectiva da análise de tensão sobre o mecanismo horizontal ELS.....  | 79 |
| Figura 73 - Distribuição de tensão sobre o subsistema transmissão de carga 1 (TC_E1).....  | 80 |
| Figura 74 – Distribuição de tensão sobre o subsistema alinhamento horizontal 2 (AH_E2), e tensão máxima de 64,91 MPa. ....   | 80 |
| Figura 75 - Distribuição de tensão sobre o subsistema eixo guia 2 (EG_E2), e tensão máxima de 80,31 MPa. ....  | 80 |
| Figura 76 - Distribuição de tensão sobre o subsistema alojamento 3 (AL_E3), e tensão máxima de 10,05 MPa.....  | 81 |
| Figura 77 - Distribuição de tensão sobre o subsistema fixação do corpo de prova ELS 3 (FCP_E3), e tensão máxima de 9,16 MPa. ....  | 81 |
| Figura 78 - Distribuição de tensão sobre o subsistema suporte de ligação 2 (SL_E2), e tensão máxima de 18,07 MPa.....  | 81 |
| Figura 79 - Distribuição de tensão sobre o subsistema estrutural ELS 1 (EST_E1), e tensão máxima de 30,58 MPa.....   | 82 |
| Figura 80 - Distribuição de tensão sobre o subsistema placa base 1 (PB_E1), e tensão máxima de 11,33 MPa.....  | 82 |
| Figura 81 – Chapas cortadas nas dimensões solicitadas e enumeradas.....  | 84 |
| Figura 82 – Conjunto torre DCB após usinagem dos rasgos e furos .....  | 84 |
| Figura 83 – Conjunto torre DCB e impactador após posicionamento.....   | 85 |
| Figura 84 – Soldagem dos conjuntos torre DCB e impactador .....  | 85 |
| Figura 85 – Dispositivo DCB com conjuntos torre DCB e impactador após pinturas.....  | 86 |
| Figura 86 – Montagem (a) do subsistema estrutural ELS e (b) do mecanismo de movimentação horizontal .....  | 86 |
| Figura 87 – Montagem do dispositivo modo-II ELS.....   | 87 |
| Figura 88 – Dispositivo Modo-II ELS após a pintura .....   | 87 |
| Figura 89 – Montagem da máquina de impacto com o dispositivo DCB. ....   | 88 |
| Figura 90 – Imagem do impactador e da torre DCB.....   | 89 |
| Figura 91 – Quadro a quadro ensaio DCB com o corpo de prova CP_DCB01. ....   | 89 |
| Figura 92 – Quadro a quadro ensaio DCB com o corpo de prova CP_DCB02. ....   | 90 |
| Figura 93 – Quadro a quadro ensaio DCB com o corpo de prova CP_DCB03. ....   | 90 |
| Figura 94 – Movimento de abertura do corpo de prova.....   | 91 |
| Figura 95- Área fraturada do corpo de prova CP_DCB01.....  | 92 |
| Figura 96 – Dispositivo modo-II ELS montado para ensaio. ....  | 93 |
| Figura 97 - Quadro a quadro do ensaio ELS com o corpo de prova CP_ELS03 .....  | 94 |
| Figura 98 – Corpo de prova CP_ELS03 após ensaio de fratura modo-II ELS .....   | 95 |
| Figura 99 – Região do corpo de prova ELS onde há cisalhamento do adesivo epóxi. ....   | 95 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1 - Matriz morfológica com os princípios de solução escolhidos para o dispositivo Modo-I DCB Dinâmico ..... | 52 |
| Quadro 2 - Matriz morfológica com os princípios de solução escolhidos para o dispositivo Modo-II ELS Dinâmico..... | 64 |
| Quadro 3 - Matriz morfológica com a escolha dos novos itens para o dispositivo ELS dinâmico .....                  | 73 |
| Quadro 4 - Material selecionado após a simulação para o dispositivo modo-I DCB dinâmico .....                      | 77 |
| Quadro 5 - Material selecionado após a simulação para o dispositivo modo-II ELS dinâmico .....                     | 83 |
| Quadro 6 - Condições de teste dos corpos de prova ELS. ....  | 93 |

## **LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIações**

4ENF - Four Point End-Notched Flexure

ASTM - American Society for Testing and Materials

CNF - Center-Notched Flexure

DCB - Double Cantilever Beam

ELS - End Loaded Split

ENF - End-Notched Flexure

ISO - International Organization for Standardization

MMB - Mixed-Mode Bending

ONF - Over-Notched Flexure

SLB - Single-leg Bending



## SUMÁRIO

|  |            |
|--|------------|
| <b>CAPÍTULO I.....</b>   | <b>14</b>  |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>14</b>  |
| <b>1.1 Objetivos .....</b>   | <b>15</b>  |
| <b>1.1.1 Objetivo Geral .....</b>  | <b>15</b>  |
| <b>1.1.2 Objetivos Específicos.....</b>  | <b>15</b>  |
| <b>CAPÍTULO II .....</b>   | <b>16</b>  |
| <b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>   | <b>16</b>  |
| <b>2.1 Modos de Fratura Interlaminar .....</b>   | <b>16</b>  |
| <b>2.2 Dispositivos Desenvolvidos para Estudo de Fratura Interlaminar.....</b>             | <b>17</b>  |
| <b>2.2.1 Dispositivos para Estudo de Fratura Interlaminar Modo-I DCB .....</b>             | <b>17</b>  |
| <b>2.2.2 Dispositivos Desenvolvidos para Estudo de Fratura Interlaminar Modo-II ELS ..</b> | <b>34</b>  |
| <b>CAPÍTULO III .....</b>  | <b>40</b>  |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>   | <b>40</b>  |
| <b>3.1 Metodologia de Projeto .....</b>  | <b>40</b>  |
| <b>3.2 Metodologia de Filmagem .....</b>   | <b>41</b>  |
| <b>3.3 Fabricação dos corpos de prova .....</b>  | <b>42</b>  |
| <b>CAPÍTULO IV .....</b>   | <b>44</b>  |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>   | <b>44</b>  |
| <b>4.1 Projeto Informacional .....</b>   | <b>44</b>  |
| <b>4.2 Projeto Conceitual.....</b>   | <b>47</b>  |
| <b>4.2.1 Projeto Conceitual do Dispositivo Modo-I DCB Dinâmico.....</b>                    | <b>47</b>  |
| <b>4.2.2 Projeto Conceitual do Dispositivo Modo-II ELS Dinâmico.....</b>                   | <b>53</b>  |
| <b>4.3 Protótipo Funcional.....</b>  | <b>65</b>  |
| <b>4.3.1 Protótipo funcional do Dispositivo Modo-I DCB Dinâmico.....</b>                   | <b>65</b>  |
| <b>4.3.2 Protótipo funcional do Dispositivo Modo-II ELS Dinâmico .....</b>                 | <b>69</b>  |
| <b>4.4 Projeto Preliminar .....</b>  | <b>74</b>  |
| <b>4.4.1 Projeto Preliminar do Dispositivo Modo-I DCB Dinâmico.....</b>                    | <b>74</b>  |
| <b>4.4.2 Projeto Preliminar do Dispositivo Modo-II ELS Dinâmico .....</b>                  | <b>77</b>  |
| <b>4.5 Projeto Detalhado .....</b>   | <b>83</b>  |
| <b>4.6 Fabricação.....</b>   | <b>83</b>  |
| <b>4.6.1 Fabricação do Dispositivo Modo-I DCB Dinâmico .....</b>                           | <b>84</b>  |
| <b>4.6.2 Fabricação do Dispositivo Modo-II ELS Dinâmico .....</b>                          | <b>86</b>  |
| <b>4.7 Testes .....</b>  | <b>88</b>  |
| <b>4.7.1 Teste do Dispositivo Modo-I DCB Dinâmico.....</b>                                 | <b>88</b>  |
| <b>4.7.2 Teste do Dispositivo Modo-II ELS Dinâmico.....</b>                                | <b>92</b>  |
| <b>CAPÍTULO V .....</b>  | <b>96</b>  |
| <b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>   | <b>96</b>  |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>97</b>  |
| <b>APÊNDICES .....</b>   | <b>105</b> |
| <b>ANEXOS.....</b>   | <b>115</b> |

## CAPÍTULO I

### 1 INTRODUÇÃO

A fratura interlaminar é um problema que está presente em materiais compósitos e juntas adesivas devido a presença de uma interface (laminas ou camadas), para este grupo de materiais dá-se o nome de materiais dissimilares, os quais são fabricados pela combinação de materiais tais como metal-metal, polímero-polímero e metal-polímero.

A indústria aeroespacial tem sido a grande responsável pelo desenvolvimento de novas tecnologias, inclusive no estudo de novas estruturas. Partindo deste pressuposto, o estudo aprofundado sobre os materiais compósitos e juntas adesivas tem evoluído. Os materiais compósitos, por possuírem alta resistência e rigidez mecânica, aliado a uma baixa densidade, e as juntas adesivas pelo fato de poderem substituir os métodos tradicionais de ligação, tais como: uniões soldadas, aparafusadas e rebitadas (da Silva et al. 2011), e poder oferecer a possibilidade de ligações de materiais dissimilares, amortecimento de vibrações e distribuição de tensões mais uniforme. No entanto, estas estruturas possuem algumas desvantagens como a falha por delaminação interna que ocorre nos compósitos sujeitos ao impacto, e a forças de arrancamento sofridas pelas juntas adesivas.

Para aprimorar as propriedades de adesão destas estruturas diversos estudos têm sido realizados, buscando estudar a fratura interlaminar, a qual pode se apresentar em fratura interlaminar modo-I (modo de abertura), modo-II (modo de cisalhamento), modo-III (modo de rasgamento), ou modo misto (combinação de modos de fratura), a depender do tipo de carregamento aplicado.

Bourke (2007) realizou ensaios de fratura interlaminar para estruturas compósitas, onde foi aplicado o ensaio de fratura modo-I dinâmico para simular a quantidade de energia que era dissipada por delaminação em um impacto balístico. Cook (2001) trabalhou em sua tese com a caracterização de fratura em compósitos pelos ensaios modo-I e modo-II. Zhang (2010) foi um dos autores que trabalhou em seu doutorado com ensaio de tenacidade a fratura em juntas adesivas, utilizando os ensaios modo-I e modo-II para caracterizar uma junta de GFRP coladas com um adesivo epóxi.

Os ensaios de fratura interlaminar têm sido estudados para várias condições de teste. Um dos parâmetros importantes tem sido o tipo de carregamento utilizado

no ensaio, onde os resultados têm sido divergentes para carregamento estático e dinâmico.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Desenvolver dispositivos para estudo de fratura interlaminar modo-I e modo-II sob cargas dinâmicas para materiais dissimilares.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Para que o objetivo geral seja atingido se faz necessários os seguintes objetivos específicos:

- Utilizar a metodologia de projeto para o desenvolvimento dos dispositivos modo-I e modo-II para materiais dissimilares;
- Efetuar simulação computacional para dimensionamento dos dispositivos.
- Realizar um projeto informacional voltado para o estudo de dispositivos para fratura interlaminar.
- Analisar o comportamento dos corpos de prova quando sujeitos a ensaios de fratura interlaminar.

## CAPÍTULO II

### 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 2.1 Modos de Fratura Interlaminar

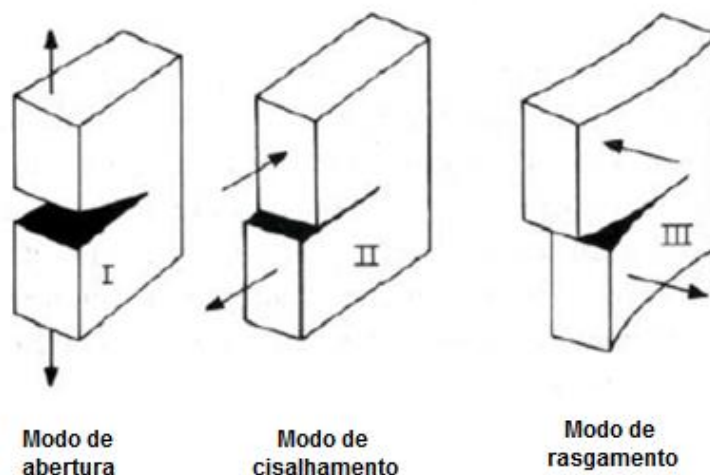
A mecânica dos sólidos deformáveis muitas vezes assume que um material é homogêneo, isotrópico, e livre de defeitos, tais como microfissuras e vazios. Estas suposições nem sempre são válidas. A mecânica da fratura baseia-se na hipótese de que uma estrutura sempre irá conter defeitos, e estes podem estar presentes sob a forma de trincas superficiais ou internas. Nos metais e ligas, as trincas são geralmente causadas por fabricação e processamento. Estas pequenas trincas devem ser contabilizadas na análise, pois por estarem quase sempre presentes, os componentes podem falhar em tensões muito inferiores a resistência do material.

Os compósitos também são materiais susceptíveis à falha conhecida por fratura interlaminar, também chamada de delaminação, que ocorre quando as camadas compósitas são separadas. Uma das causas para o surgimento da delaminação é a presença de descontinuidades entre as camadas, fornecendo pontos de nucleação e iniciação para que a falha ocorra. Segundo Griffith (1920), a propagação da trinca ocorrerá se a energia liberada sobre o crescimento de trinca for o suficiente para fornecer toda a energia que é necessária para o crescimento da mesma, podendo ocorrer a falha em tensões muito inferiores ao limite de escoamento ou ao limite de resistência.

A fratura interlaminar pode ser estudada das seguintes maneiras, são eles: modo I, modo II, modo III e modo misto, como mostrado na

Figura 1.

Figura 1 – Os tipos de fratura interlaminar modo-I, modo-II e modo-III



Fonte- COOK (2001)

- Modo I (abertura) corresponde a uma tensão de tração gerada pelo deslocamento perpendicular ao plano da trinca;
- Modo II (cisalhamento) corresponde a uma tensão de cisalhamento gerada por um deslocamento perpendicular à frente da trinca;
- Modo III (rasgamento) corresponde a uma tensão de cisalhamento gerada por um deslocamento paralelo à frente da trinca.
- Modo misto, corresponde a uma combinação entre os modos I, II e III.

Os modos de fratura são baseados nos três eixos principais do espaço tridimensional de tensão, onde há a solicitação de carga responsável pela fratura.

## 2.2 Dispositivos Desenvolvidos para Estudo de Fratura Interlaminar

### 2.2.1 Dispositivos para Estudo de Fratura Interlaminar Modo-I DCB

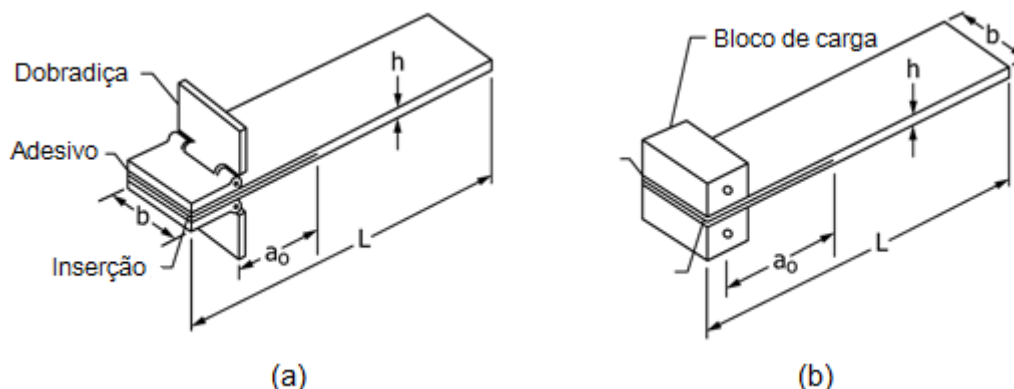
#### 2.2.1.1 Norma ASTM D5528-13 - Método de Teste Padrão para Tenacidade à Fratura Interlaminar Modo I de Compósitos de Matriz Polimérica com Reforço de Fibra Unidirecional

A norma ASTM D5582-13 apresenta os requisitos técnicos para a realização do ensaio de tenacidade à fratura interlaminar em materiais compósitos, quando submetidos a uma carga quase estática.

Para o ensaio quase estático especificado na norma ASTM, o double cantilever beam (DCB) é composto por um corpo de prova retangular e de espessura uniforme, contendo uma inserção não adesiva no seu plano médio, agindo como um iniciador de delaminação ou pré-trinca. A transmissão dos esforços de abertura do corpo de

prova DCB são aplicados por meio de dobradiças ou blocos de carga colados na extremidade que contém a pré-trinca. A extremidade do DCB é aberta através do controle de deslocamento realizado por uma máquina de teste ligado às dobradiças ou blocos de carga, onde a carga e o comprimento de delaminação são registrados. A Figura 2 mostra a composição de um corpo de prova DCB.

Figura 2 - Corpo de prova DCB a) com dobradiça; b) com bloco de carga.



Fonte- ASTM D5582-13 (2013)

#### 2.2.1.1.1 Ensaio de fratura interlaminar modo-I DCB utilizando dobradiças

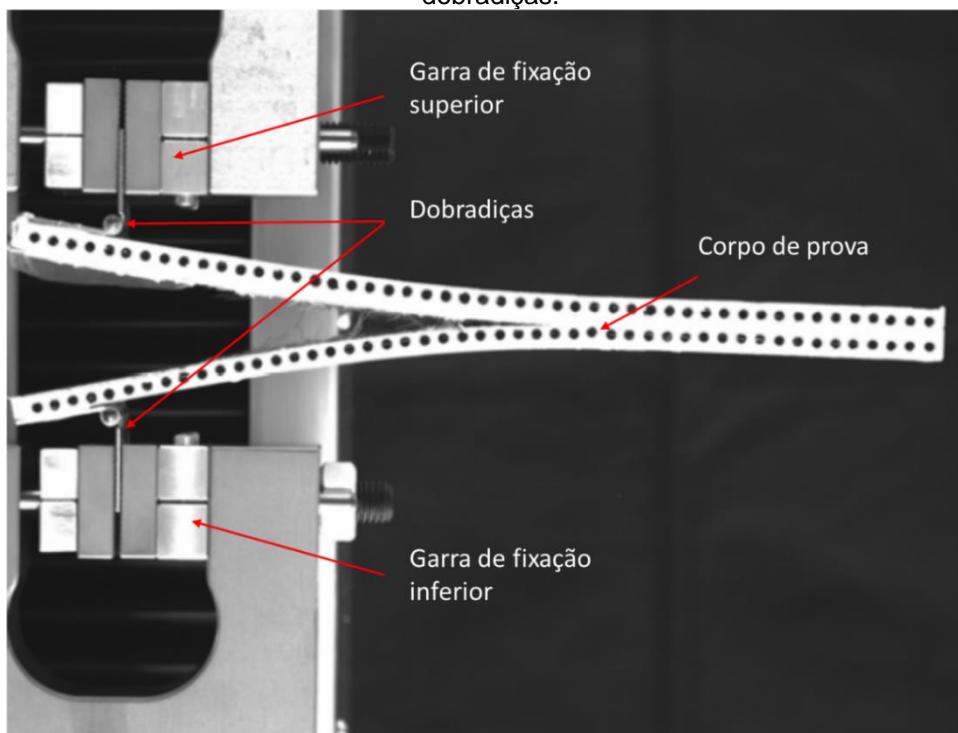
A configuração do corpo de prova DCB, utilizando dobradiças como meio de ligação com a máquina de ensaio de tração foi utilizada na tese de doutorado de Zhang (2010), na Escola Politécnica Federal de Lausanne.

Ele utilizou tal configuração para a realização de ensaios de fratura interlaminar modo-I quase estático. Os corpos de prova consistiam em dois laminados compósitos pultrudados de fibra de vidro embebidos em resina de poliéster, com dimensões úteis de 225,0 x 50,0 x 6,0mm, ligados por um sistema adesivo epóxi com espessura de 2,0mm, e comprimento de pré-trinca de 25mm. As dobradiças foram coladas nos laminados com adesivo epóxi, e ligadas à máquina de ensaio através de garras de fixação. O ensaio foi conduzido a uma taxa de deslocamento constante de 1mm/min, atingindo um pico de carga máximo de 530N, e o teste foi encerrado manualmente quando o comprimento de trinca alcançou 150mm.

Mostra-se na Figura 3 a montagem do corpo de prova DCB feita por Zhang (2010) a uma máquina de ensaio de tração. Mostra-se na Figura 4 a montagem de um corpo de prova DCB utilizada no trabalho de dissertação de Cook (2001), na

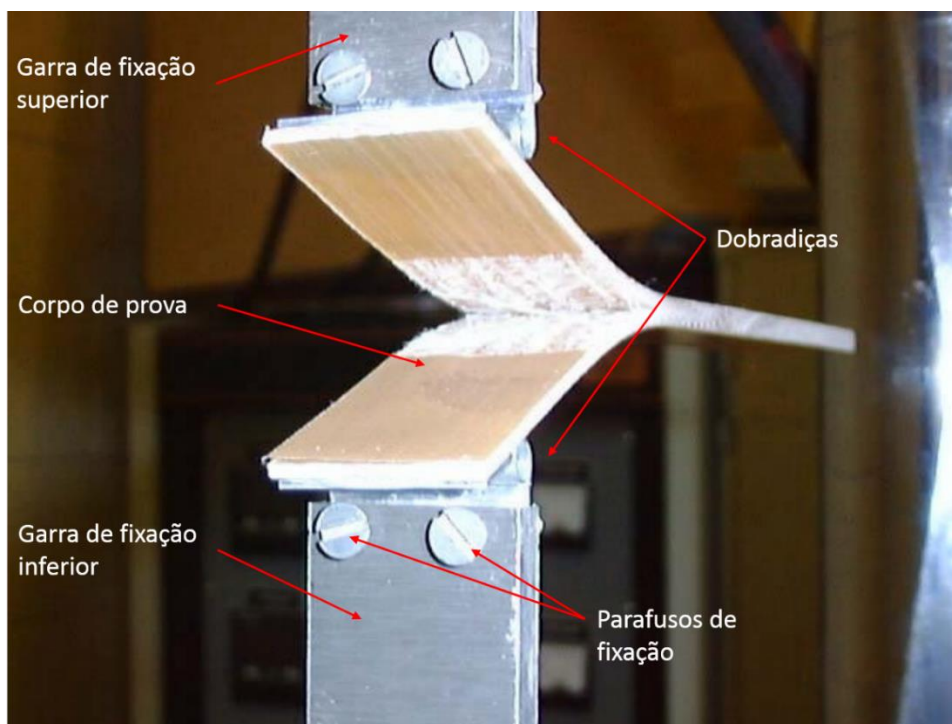
Universidade Estadual de Montana, onde também foi utilizado sistema de dobradiças, e a fixação das mesmas às garras foi utilizado parafusos.

Figura 3 - Montagem de um corpo de prova DCB à máquina de ensaio de tração, utilizando dobradiças.



Fonte- Zhang (2010)

Figura 4 - Montagem de um corpo de prova DCB utilizada na dissertação de Cook (2001)

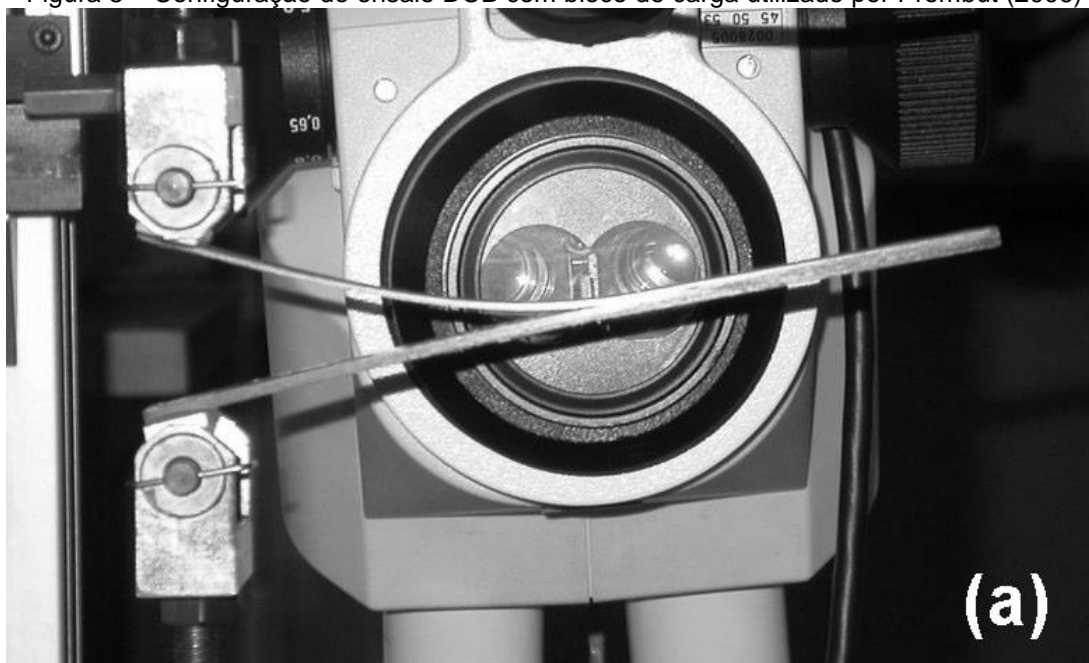


Fonte- Cook (2001)

#### 2.2.1.1.2 Ensaio de fratura interlaminar modo-I DCB utilizando blocos de carga

A configuração do corpo de prova DCB, utilizando blocos de carga, é a mais utilizada nos ensaios de fratura interlaminar modo-I. Consiste em dois blocos de metal retangulares, com um furo passante em cada bloco, onde são inseridos os pinos de carga que fazem a ligação entre as garras de fixação e o corpo de prova. Esta configuração de corpo de prova está presente nos trabalhos de Prombut (2006), Wood et al. (2007), Hintikka, Wallin e Saarela (2010), Ilyas (2010), Mohan, Ivanković e Murphy (2013), e Shedden (2013), como mostrados nas Figuras 5 a 10, respectivamente.

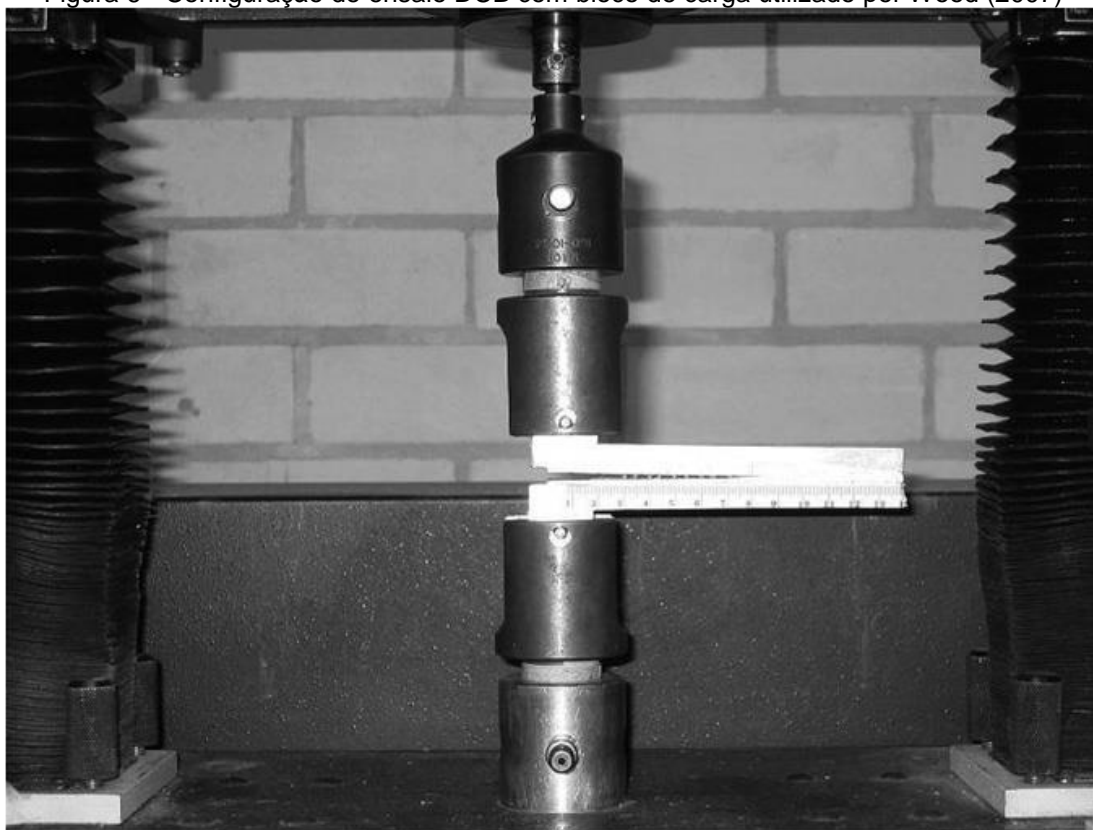
Figura 5 – Configuração de ensaio DCB com bloco de carga utilizado por Prombut (2006)



Fonte- PROMBUT (2006)

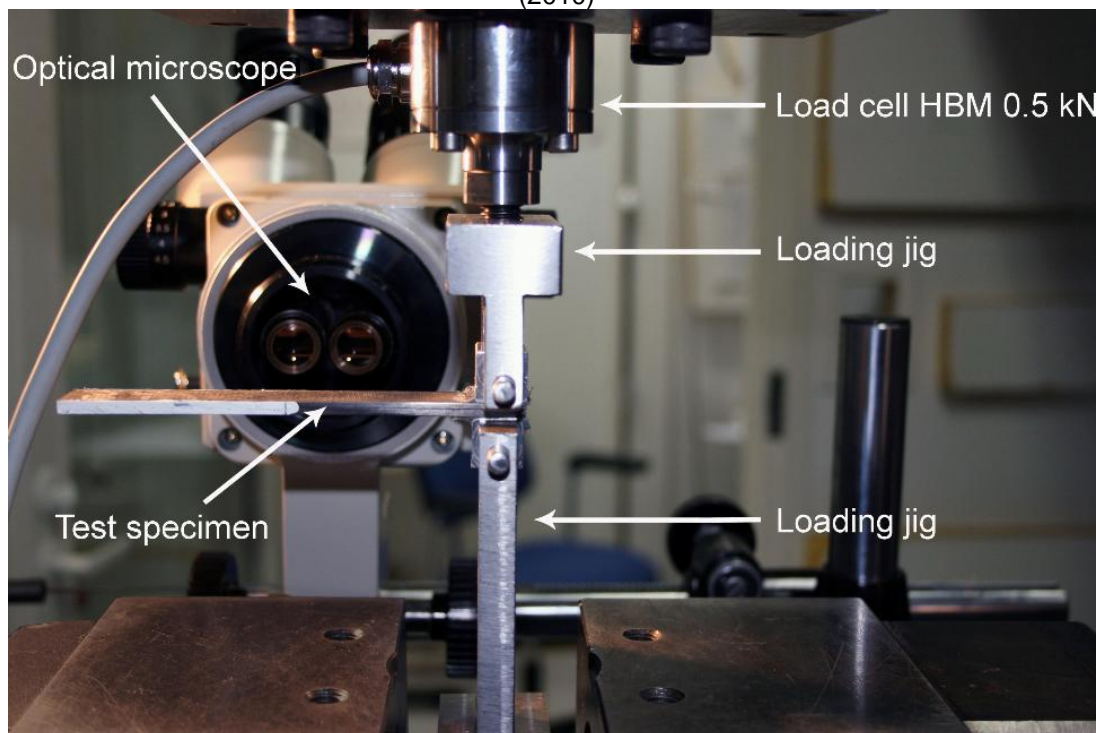


Figura 6 - Configuração de ensaio DCB com bloco de carga utilizado por Wood (2007)



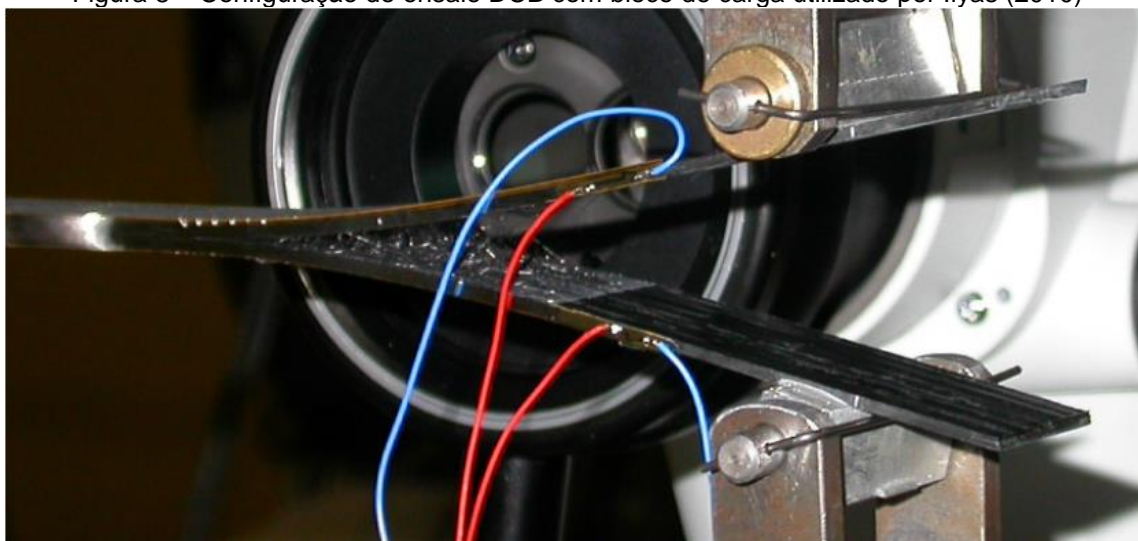
Fonte- WOOD (2007)

Figura 7 - Configuração de ensaio DCB com bloco de carga utilizado por Hintikka, Wallin e Saarela (2010)



Fonte- HINTIKKA, WALLIN E SAARELA (2010)

Figura 8 – Configuração de ensaio DCB com bloco de carga utilizado por Ilyas (2010)



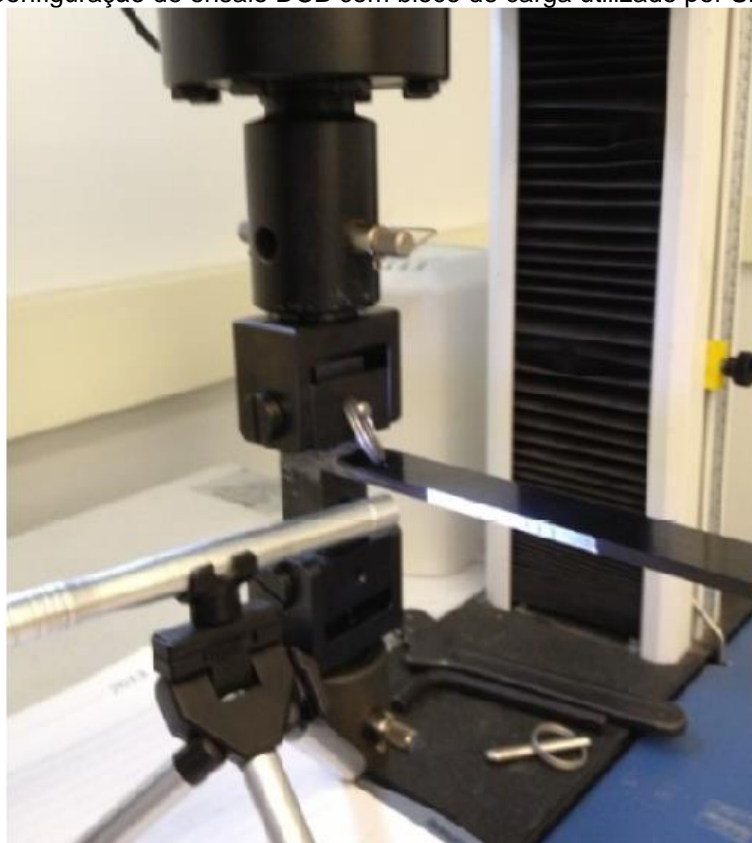
Fonte- ILYAS (2010)

Figura 9 - Configuração de ensaio DCB com bloco de carga utilizado por Mohan, Ivanković e Murphy (2013)



Fonte- MOHAN, IVANKOVIĆ E MURPHY (2013)

Figura 10 – Configuração de ensaio DCB com bloco de carga utilizado por Shedden (2013)



Fonte- SHEDDEN (2013)

#### **2.2.1.2 Dispositivo de ensaio de fratura dinâmico “wedge-impact” utilizado na Universidade de Michigan**

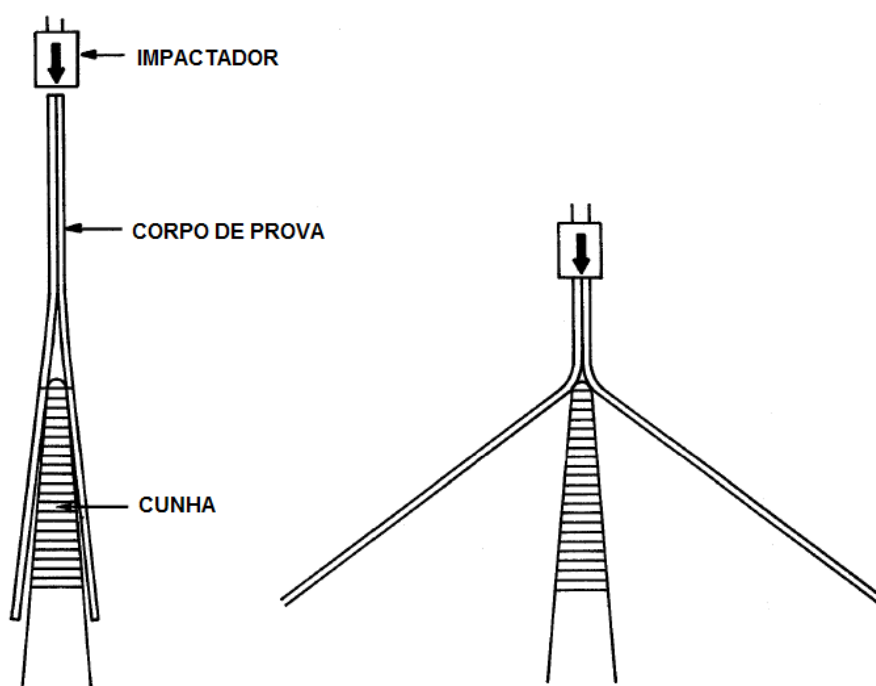
A configuração do dispositivo analisado foi utilizada por Thouless et al. (1998), na Universidade de Michigan em parceria com a Ford Motor Co., para estabelecer critérios de projeto para o uso de adesivos estruturais em aplicações automotivas em condições de impacto com extensa deformação plástica.

Para a realização dos testes foram confeccionados corpos de prova em alumínio, com espessura variando entre 1,0 e 3,0 mm, e em aço laminado, com espessura variando entre 0,5 e 1,4 mm, e cada um possuía 90,0 mm de comprimento e 20,0mm de largura, enquanto o comprimento do adesivo era de 30mm.

Os ensaios de fratura foram realizados utilizando uma máquina de ensaio de impacto por queda de peso instrumentada. A Figura 11 mostra uma configuração experimental do ensaio, onde o corpo de prova é colocado na vertical sobre uma cunha de aço endurecida com um ângulo de cunha de 10° e extremidade arredondada com raio de 1,0 mm. A extremidade da cunha é alinhada com uma marca de localização posicionada a 10,0 mm no lado do corpo de prova. O impactador possui

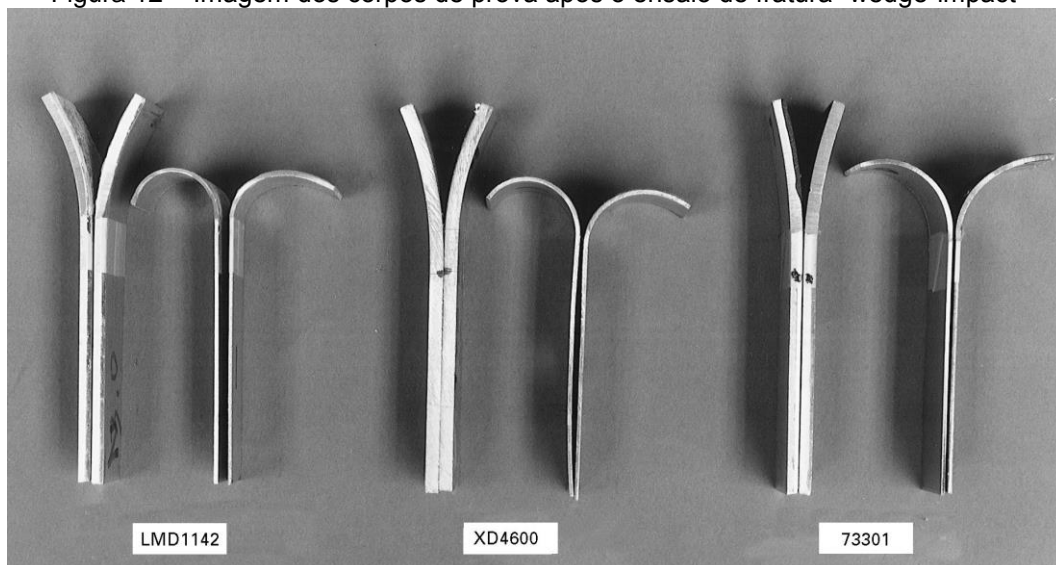
uma massa de 44,85 kg, onde a altura de queda é ajustada para que o corpo de prova seja atingido a uma velocidade de  $2,0 \pm 0,2$  m/s. O impactador força a cunha através do corpo de prova, fazendo com que seus substratos se dobrem e o adesivo seja fraturado, conforme mostrado na Figura 12. Foi relatado pelo autor a dificuldade de posicionar o corpo de prova de forma perfeitamente simétrica sobre a cunha, de modo que quando o impactador atinge o corpo de prova, ele gira, ocasionando o surgimento de raios de curvatura diferentes para cada substrato do corpo de prova.

Figura 11 – Configuração experimental do ensaio de fratura “wedge-impact”



Fonte- THOULESS et al (1998).

Figura 12 – Imagem dos corpos de prova após o ensaio de fratura “wedge-impact”



Fonte- THOULESS et al. (1998)

### **2.2.1.3 Dispositivo de ensaio de fratura modo-I dinâmico “impact-wedge peel” utilizado na Imperial College**

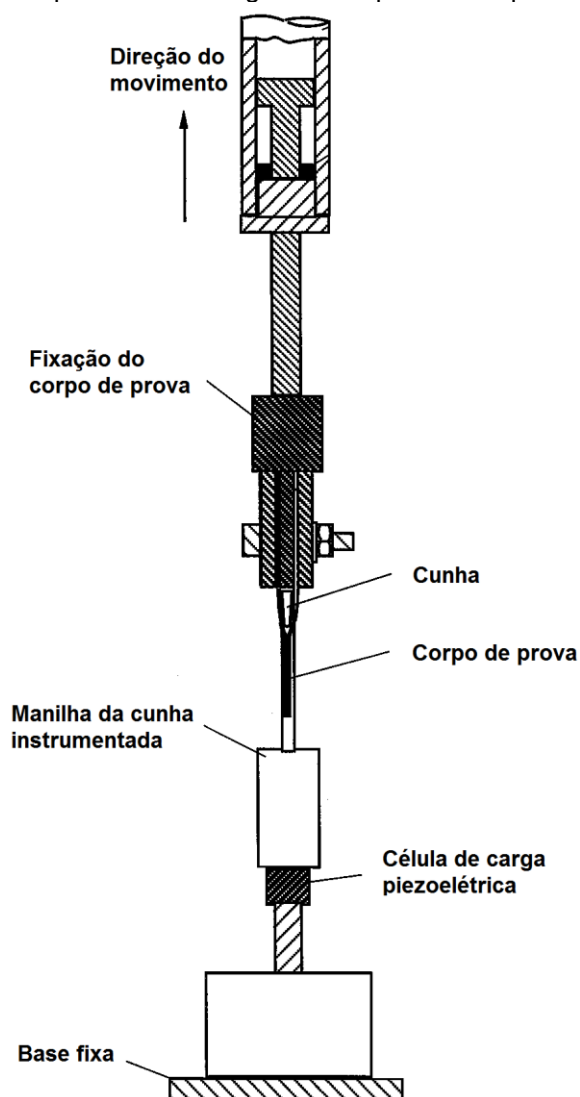
Este dispositivo foi utilizado por Blackman et al. (2000) na Imperial College, para avaliar o comportamento de fratura de juntas adesivas quando sujeitas a taxas de ensaio relativamente altas a várias temperaturas de ensaio.

Os ensaios foram realizados utilizando uma máquina servo-hidráulica de alta velocidade ajustada para 2,0 m/s. O método consiste em manter fixo o dispositivo em forma de cunha e puxar o corpo de prova, que está ligada ao cilindro móvel da máquina de ensaio, contra a cunha, provocando a fratura da interface adesiva. Apresenta-se na Figura 13 o esquema de montagem do dispositivo em uma máquina de ensaio hidráulica.

Os corpos de prova foram confeccionados em alumínio e em aço, possuindo comprimento de 90,0 mm, largura de 20,0 mm e espessura entre 0,6 e 1,7 mm. O comprimento do adesivo no corpo de prova foi de 30,0 mm. Os substratos dos corpos de prova foram conformados antes de serem colados, para que sua morfologia final possa apresentar forma de “V”. O esquema de um corpo de prova “impact-wedge peel” é mostrado na Figura 14.

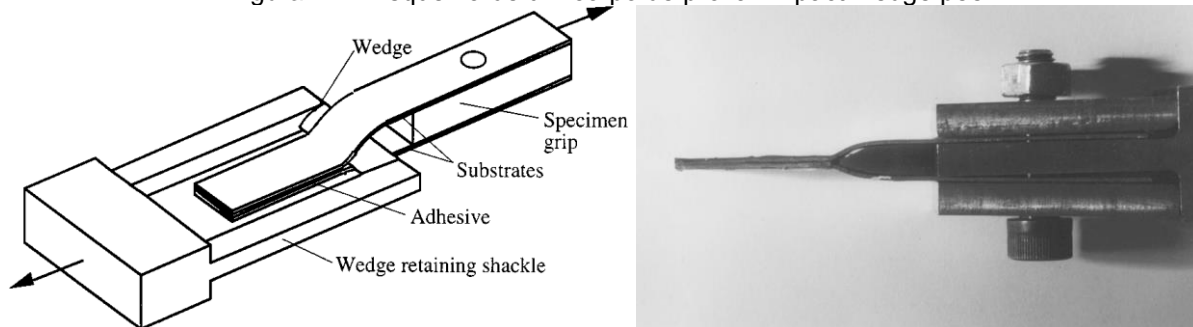


Figura 13 – Esquema de montagem do dispositivo “impact-wedge peel”



Fonte- BLACKMAN et al. (2000)

Figura 14 – Esquema de um corpo de prova “impact-wedge peel”



Fonte- BLACKMAN et al (2000)

#### 2.2.1.4 Dispositivo de ensaio DCB desenvolvido na Aalborg University

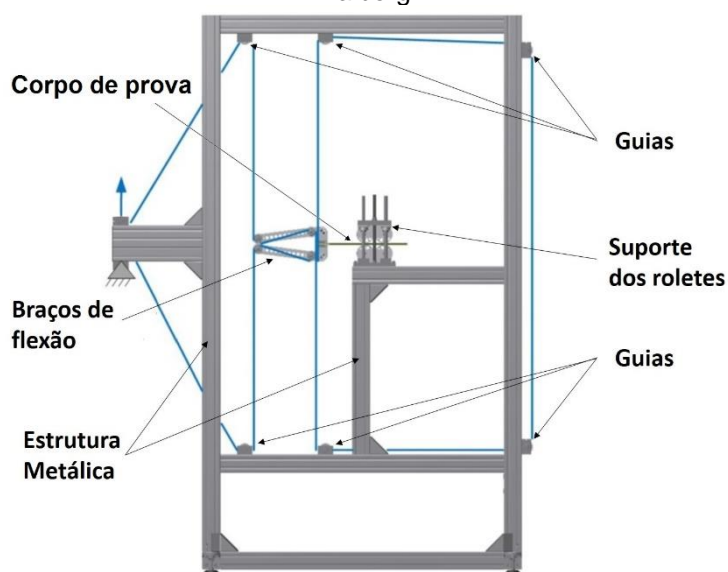
Este dispositivo foi desenvolvido na tese de Svenninggaard (2014), da Universidade de Aalborg na Dinamarca, para avaliar parâmetros da zona adesiva utilizando corpos de prova DCB.

Para o desenvolvimento do dispositivo de ensaio de fratura foi observado as seguintes necessidades e requisitos de projeto:

- Poder ser usado com uma máquina de teste de tração padrão com uma abertura de janela de aproximadamente 600 mm x 400 mm.
- A ferramenta de teste deve ser capaz de suportar as cargas que são submetidas durante o processo de teste estático ou análise de fadiga.
- A ferramenta de teste deve ser capaz de restringir a amostra corretamente em qualquer caso de carga.
- A ferramenta deve suportar tamanhos de amostras variando de (2H x t x L) 5 mm x 20 mm x 200 mm até 50 mm x 30 mm x 800 mm.
- As forças de atrito no dispositivo de ensaio devem ser suficientemente pequenas.

Com base nas premissas de projeto e na análise dos conceitos levantados Svenninggaard (2014) escolheu o seguinte conceito mostrado na Figura 15:

Figura 15 – Conceito de um dispositivo de fratura interlaminar desenvolvido na Universidade de Aalborg.



Fonte- SVENNINGGAARD (2000)

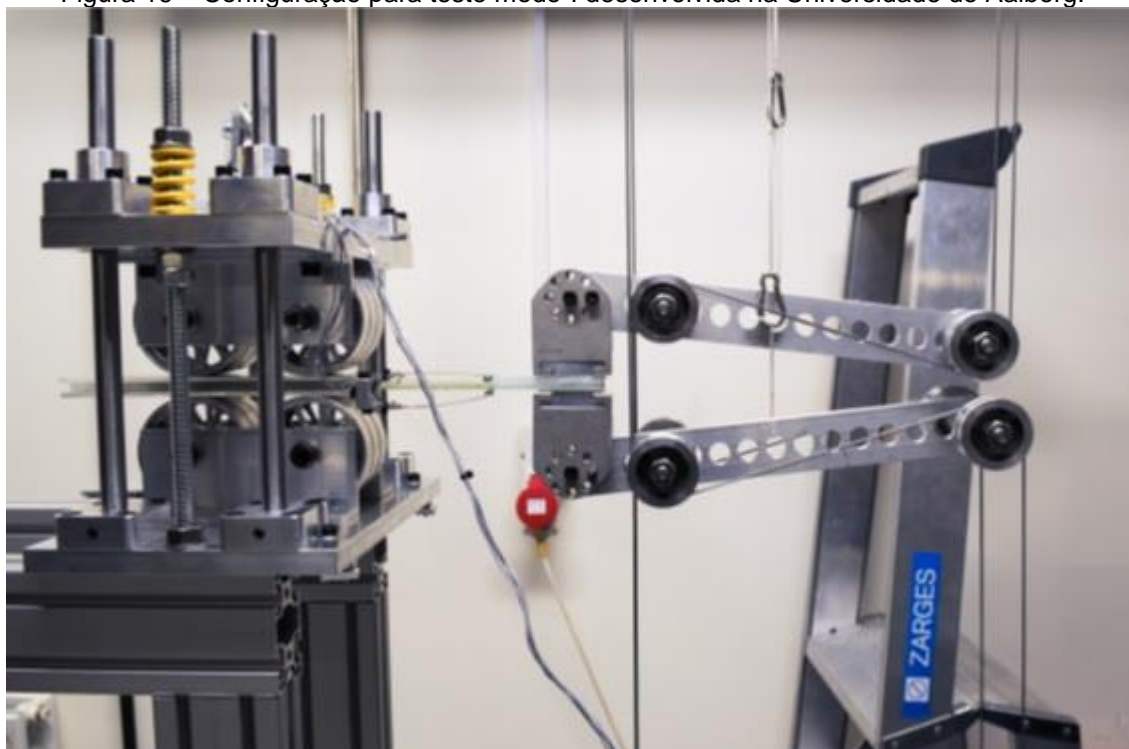
O conceito gerado se baseia na aplicação de carga ao corpo de prova por meio de um fio, onde o mesmo ao ser tracionado provoca a abertura do corpo de prova de forma simétrica, pois os dois substratos do corpo de prova sofrem o mesmo deslocamento. Os principais componentes do dispositivo são listados a seguir:

- Estrutura metálica, que é montada utilizando perfis em alumínio parafusados. Tem como função promover estabilidade estrutural, separar os rolos superiores e inferiores, e transferir esforços entre a máquina e o corpo de prova.
- Guias, responsáveis por guiar o fio ao redor do sistema. São construídos usando um eixo sólido, com dois rolamentos de baixo atrito, e um rolo guia de alumínio no exterior.
- Braços de flexão, utilizados para promover a transmissão da carga entre o fio e o corpo de prova, ajustar a inclinação e modificar o ponto de carga sobre o corpo de prova. Os braços de flexão podem ser colados ou parafusados ao corpo de prova, a depender da sua espessura, e são orientados em paralelo com o corpo de prova.
- Suporte dos roletes, tem como função guiar o corpo de prova na posição horizontal. É constituída por uma parte inferior, que possui seis roletes, e é fixada à estrutura metálica, e uma parte superior, que também possui seis roletes, e que pode ser ajustada na vertical por meio de porcas. A parte superior deve ser ajustada para apenas tocar na superfície do corpo de prova, interferindo o mínimo possível em seu movimento horizontal.

A Figura 16 mostra a montagem do corpo de prova modo-I no suporte dos roletes e ligado aos braços de flexão.



Figura 16 – Configuração para teste modo-I desenvolvida na Universidade de Aalborg.



Fonte- SVENNINGGAARD (2000)

#### 2.2.1.5 Dispositivo de ensaio DCB dinâmico “Falling wedge” utilizado na Virginia Tech

A configuração do dispositivo analisado foi desenvolvida na Virgínia Tech nos Estados Unidos, inicialmente utilizado por Xu (2001), para determinar a resistência ao impacto de adesivos eletricamente condutores, e posteriormente utilizado por Simón (2004), para calcular a taxa de liberação de energia em testes DCB dinâmicos.

O ensaio é realizado utilizando uma máquina de impacto por queda de peso, onde duas cunhas de policarbonato com ângulo de  $30^\circ$  é fixada ao peso de impacto. Estas cunhas atacam os rolamentos de esfera que estão ligados aos blocos do corpo de prova DCB que são montadas na posição vertical. A função dos rolamentos é de guiar as cunhas no momento do impacto, promover a abertura do corpo de prova criando uma fratura modo-I, e reduzir o atrito no momento do impacto entre as cunhas e o corpo de prova DCB. Mostra-se na Figura 17 a imagem da máquina montada na configuração “Falling wedge” para o ensaio DCB dinâmico, e tem-se na Figura 18 um esquema com detalhes do corpo de prova e das cunhas para o ensaio DCB dinâmico.

No estudo realizado por Xu (2001) foi possível caracterizar quantitativamente a resistência ao impacto de adesivos eletricamente condutores. Os resultados obtidos

mostram que o teste “Falling wedge” é capaz de discriminar o desempenho de impacto de adesivos e é capaz de rastrear adesivos condutores para fins de colagem.

Yamagata et al. (2017), da Tokyo Institute of Technology, utilizou um dispositivo similar ao desenvolvido por Xu (2001), apresentando pequenas alterações, como a não utilização de rolamentos nos blocos do corpo de prova, como mostrado na Figura 19. Concluiu-se que a máquina de teste de impacto “Falling wedge” pode ser utilizada para avaliar a dependência da taxa de carregamento numa ampla gama de energia de fratura, incluindo os adesivos estruturais.

Figura 17 - Máquina montada na configuração “Falling wedge” para o ensaio DCB dinâmico



Fonte- SIMÓN (2004)

Figura 18 - Esquema do dispositivo para ensaio DCB dinâmico tipo “Falling wedge”

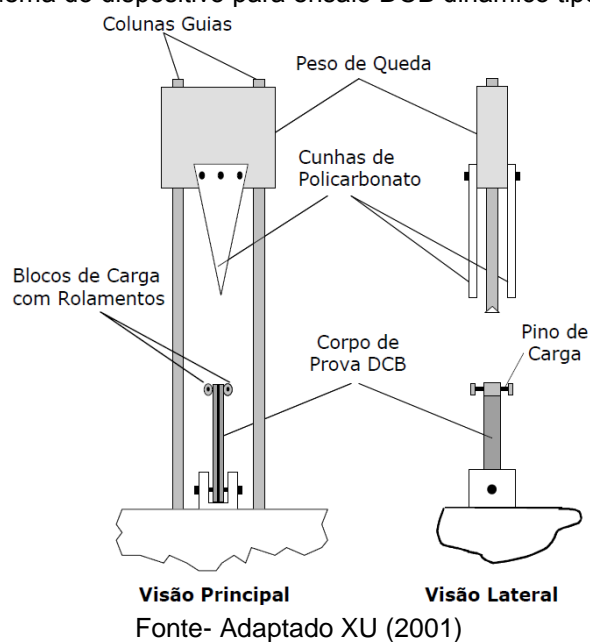
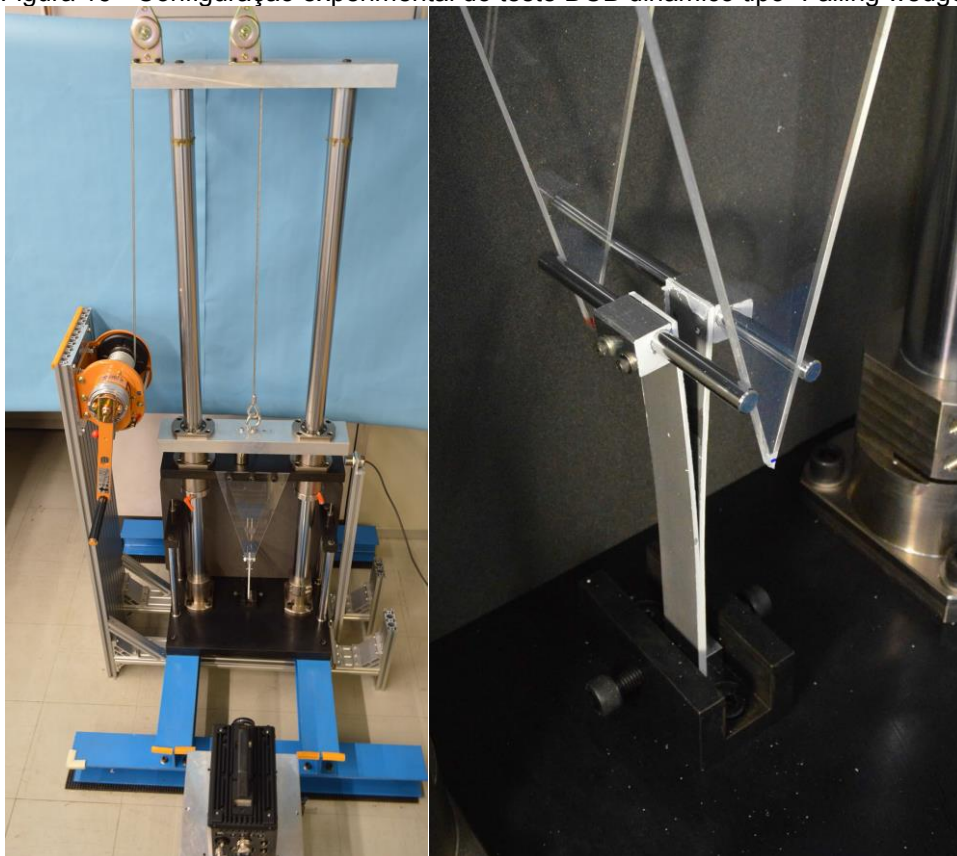


Figura 19 - Configuração experimental do teste DCB dinâmico tipo “Falling wedge”



Fonte- YAMAGATA et al. (2017)

### **2.2.1.6 Dispositivo de ensaio DCB dinâmico utilizado na Universidade de Cranfield**

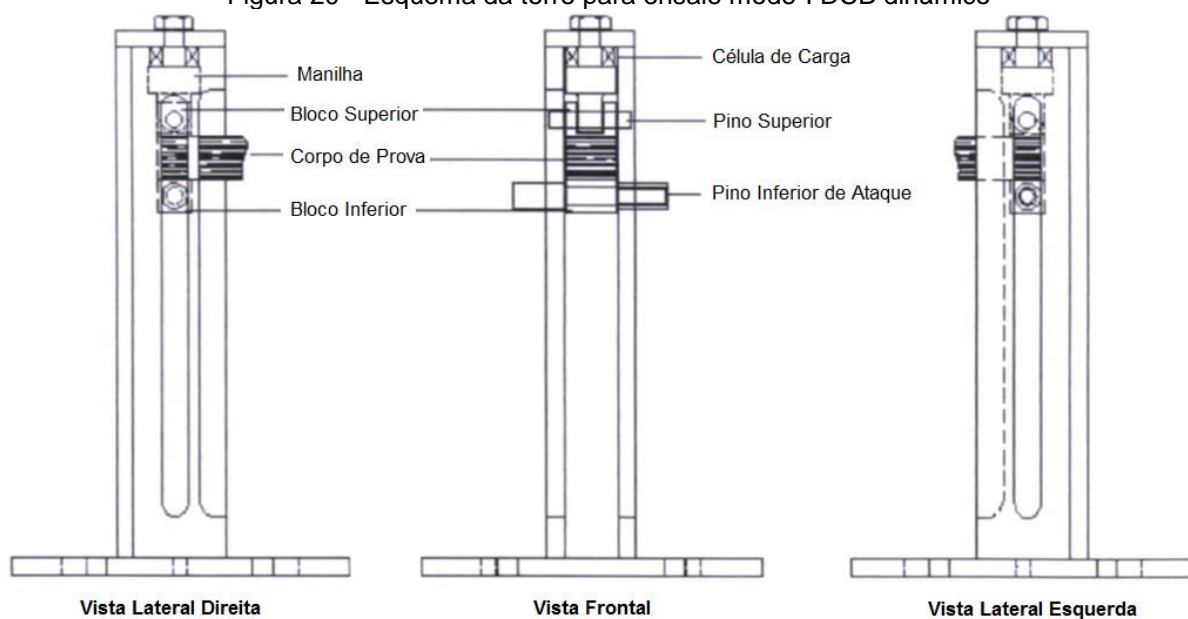
Este dispositivo foi projetado e construído por Bourke (2007), na Universidade de Cranfield para a realização de ensaios de fratura interlaminar modo-I DCB dinâmico em uma torre de queda de peso. Para a realização deste ensaio foi necessário à confecção de dois conjuntos: torre DCB e garfos de ataque.

O conjunto torre DCB consiste em uma torre quadrada, onde a parte frontal é aberta para que haja o manuseio do corpo de prova, as laterais da torre possuem rasgos, onde o pino superior prende o bloco superior e o corpo de prova à manilha que está ligada à célula de carga, e que limita o grau de liberdade do bloco superior em apenas rotação. O pino inferior está ligado ao bloco inferior e o corpo de prova, onde pode locomover-se através do rasgo, na direção vertical ou rotacionar, quando os garfos de ataque se chocam com o pino inferior. Mostra-se na Figura 20 o esquema de montagem para o ensaio modo-I DCB dinâmico.

O conjunto garfos de ataque consiste de uma base de aço, onde são soldados dois braços suportado por nervuras. A base de aço é acoplada ao peso de impacto, o qual possibilita a mudança da energia cinética através da mudança do peso de impacto. Durante o ensaio, os garfos de ataque são guiados pelas guias da torre de queda de peso, onde ao passar pela torre DCB atingem simultaneamente as extremidades do pino inferior, aplicando carga dinâmica de impacto ao corpo de prova.

Na Figura 21 é mostrado o conjunto garfos de ataque. Mostra-se na Figura 22 a montagem do corpo de prova no conjunto de torre DCB dinâmico, evidenciando o posicionamento da célula de carga e os garfos de ataque. Mostra-se na Figura 23 o corpo de prova após ser testado pelo dispositivo de ensaio DCB dinâmico.

Figura 20 - Esquema da torre para ensaio modo-I DCB dinâmico



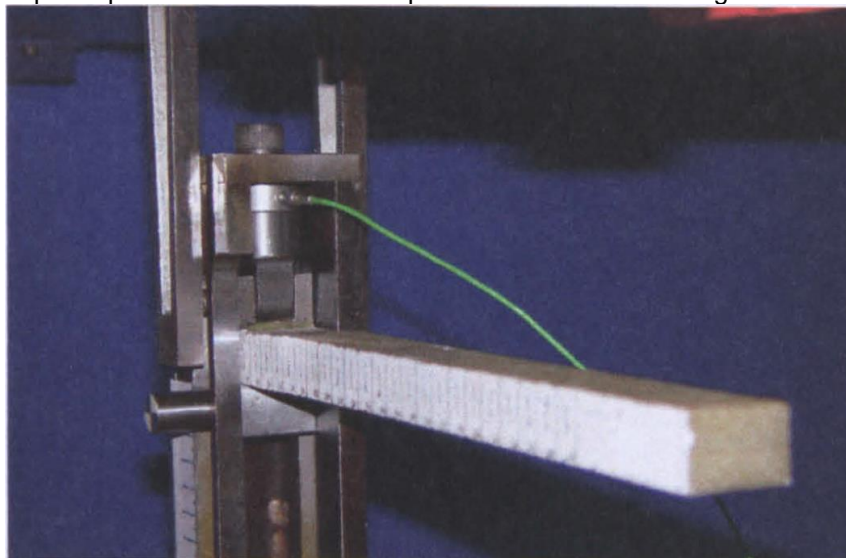
Fonte- BOURKE (2007)

Figura 21 - Garfos de ataque



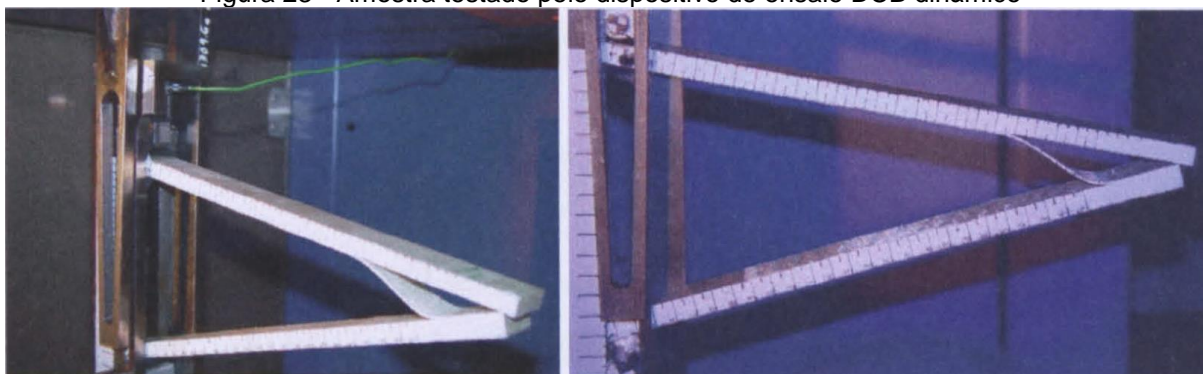
Fonte- BOURKE (2007)

Figura 22 - Corpo de prova modo-I DCB no dispositivo dinâmico com os garfos de ataque visíveis



Fonte- BOURKE (2007)

Figura 23 - Amostra testado pelo dispositivo de ensaio DCB dinâmico



Fonte- BOURKE (2007)

## 2.2.2 Dispositivos Desenvolvidos para Estudo de Fratura Interlaminar Modo-II ELS

### 2.2.2.1 Dispositivo de ensaio ELS quase estático utilizado na Universidade de Dublin

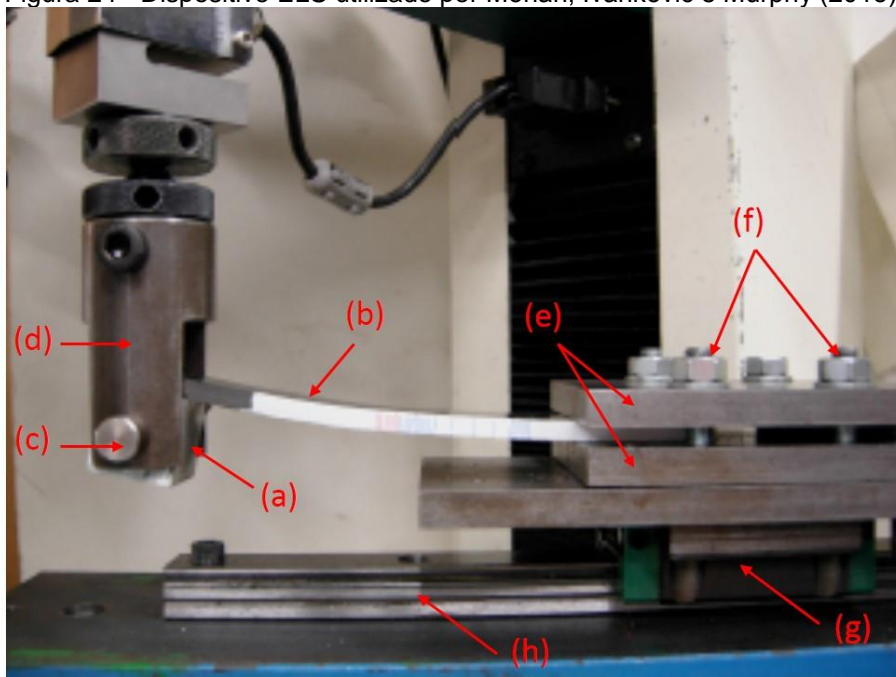
Mohan, Ivanković e Murphy (2013), da Universidade de Dublin, realizaram ensaios de fratura interlaminar modo-II ELS quase estático em juntas compósitas cocuradas de pré-impregnados de epóxi/fibra de carbono unidirecionais e adesivo epóxi. Os corpos de prova cortados tinham dimensões de 190 x 25 x 5,6 mm, e pré-trinca de 65 mm.

É mostrado na Figura 24 o dispositivo de ensaio ELS utilizado, que consiste em um bloco de carga (a) de alumínio colado na extremidade pré-trincada do corpo de prova (b); um pino de carga (c) que faz a ligação do bloco de carga à garra de fixação (d) máquina de tração, permitindo o deslocamento vertical dessa extremidade; um



sistema de fixação da extremidade não-trincada do corpo de prova feita por placas de aço (e) apertadas por parafusos (f), essas placas são ligadas a um conjunto de patim (g) e trilho (h), que permite apenas o deslocamento na horizontal.

Figura 24 - Dispositivo ELS utilizado por Mohan, Ivanković e Murphy (2013)



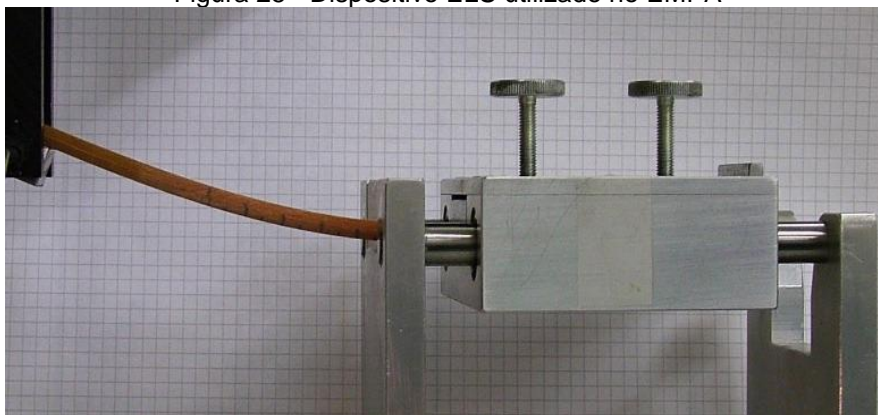
Fonte- MOHAN, IVANKOVIĆ e MURPHY (2013)

#### 2.2.2.2 Dispositivo de ensaio de fratura e fadiga ELS utilizado no EMPA na Suíça

Este dispositivo foi desenvolvido no EMPA - Laboratórios Federais Suíços de Ciência e Tecnologia de Materiais, e foi utilizado por Brunner et al. (2013) em ensaios de resistência à delaminação por fadiga modo-II, e também utilizado por Blackman, Brunner e Williams (2006) para a realização de ensaios de fratura modo-II.

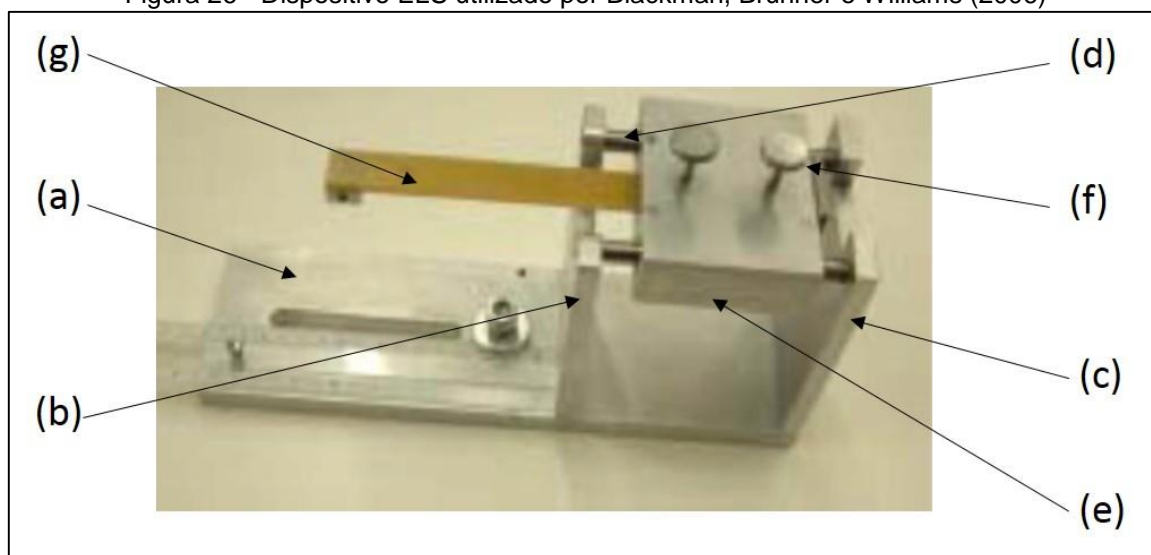
O dispositivo utilizado para realizar o ensaio de fratura interlaminar modo-II é mostrado nas Figuras 25 e 26, o qual possui uma estrutura em aço, tem uma base de fixação (a) soldada a uma placa frontal (b) e outra traseira (c), que servirá de sustentação para as guias lineares cilíndricas (d), por onde passa o bloco de fixação (e) do corpo de prova que permite movimento na horizontal, e dois parafusos (f) utilizados para fixação do corpo de prova (g).

Figura 25 - Dispositivo ELS utilizado no EMPA



Fonte- BRUNNER et al. (2013)

Figura 26 - Dispositivo ELS utilizado por Blackman, Brunner e Williams (2006)



Fonte- BLACKMAN, BRUNNER e WILLIAMS (2006)

### 2.2.2.3 Dispositivo de Ensaio ELS dinâmico da Virginia Tech

Este dispositivo foi utilizado por Simón (2004) em sua dissertação de mestrado na Universidade Virginia Tech, onde buscava determinar a taxa de liberação de energia modo-II em corpos de prova de alumínio e de materiais compósitos.

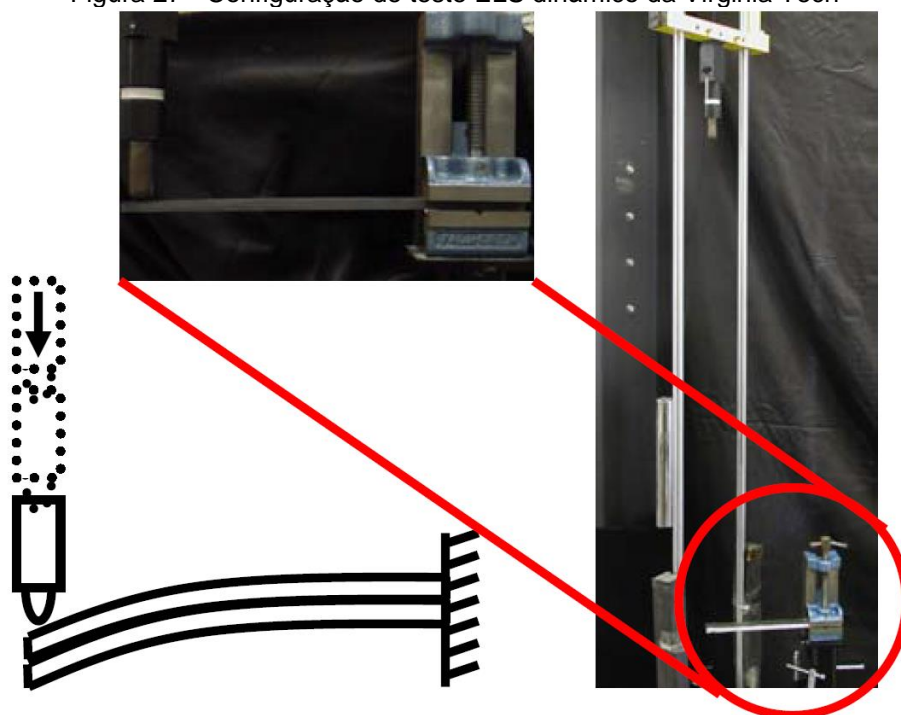
O dispositivo ELS dinâmico consiste em um mecanismo de fixação parecido com um torno de ranhuras laterais montadas em um pedestal personalizado, esse pedestal é fixado a base da torre de queda utilizando grampos-C. O ensaio foi executado utilizando uma máquina de impacto por queda de peso, onde o corpo de prova foi fixado na horizontal no dispositivo ELS, em seguida um impactador de ponta hemisférica, conectado ao peso de queda da máquina, atinge o corpo de prova proporcionando a deflexão e propagação da trinca modo-II. O impactador pode cair de uma altura máxima de 0,7 m, atingindo a extremidade pré-trincada do corpo de



prova a uma velocidade máxima de 3,7 m/s. A configuração de teste do dispositivo ELS é mostrada na Figura 27.

Vale salientar que diferentemente dos dispositivos ELS convencionais analisados anteriormente, este dispositivo ELS dinâmico não possui grau de liberdade na horizontal para a extremidade engastada do corpo de prova, pois não existe acoplamento entre o impactador e o corpo de prova. Com isso, temos que o ponto de aplicação de carga sobre o corpo de prova não é fixo, pois a extremidade do impactador desliza sobre o corpo de prova, ocasionando atrito.

Figura 27 - Configuração de teste ELS dinâmico da Virginia Tech



Fonte- SIMÓN (2004)

#### 2.2.2.4 Dispositivo de Ensaio ELS Dinâmico modificado da Universidade de Southampton

Este dispositivo foi desenvolvido para a tese de PhD de Verdiere (2009), na Escola de Engenharia da Universidade de Southampton, para realizar ensaio de delaminação modo-II dinâmico utilizando um dispositivo ELS modificado submetido a uma carga de impacto transmitida por uma torre de queda de peso.

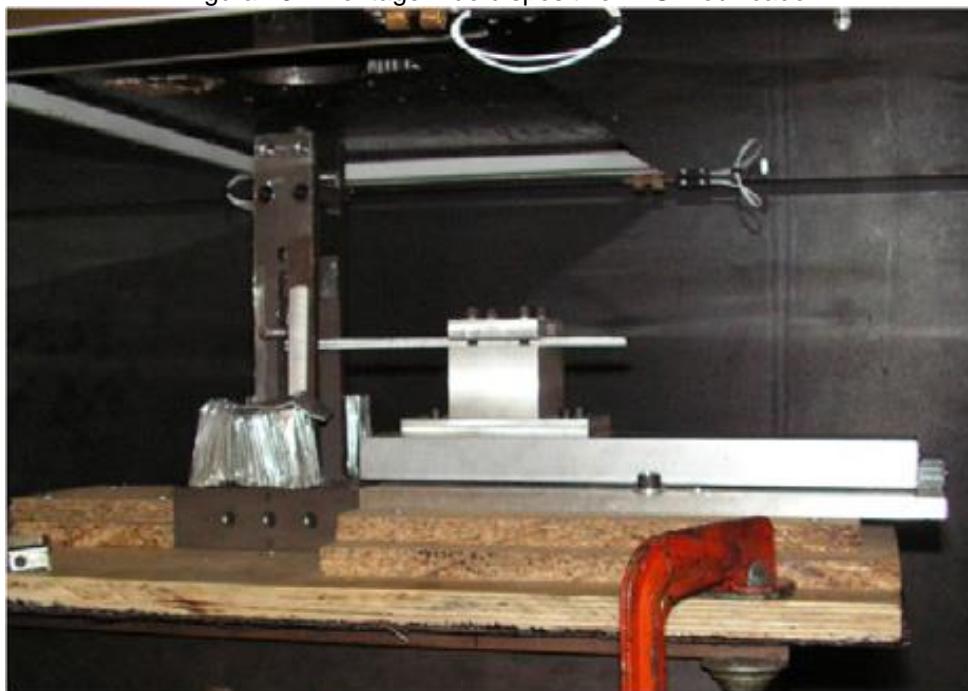
Este dispositivo foi projetado para reproduzir os mesmos graus de liberdade que o corpo de prova possui em um ensaio quase estático, ou seja, movimento vertical na extremidade com pré-trinca e movimento na horizontal para a extremidade engastada. O dispositivo ELS modificado é composto por um dispositivo ELS

convencional, e outros elementos adicionais como garfos de ataque, um guia vertical para o pino de carga (para este caso foi utilizada uma torre DCB dinâmica), e dois amortecedores de colisão para desacelerar os garfos de ataque, como mostra a Figura 28.

O ensaio funciona da seguinte maneira: os garfos de ataque (a) se chocam com o pino de carga (b) a uma velocidade especificada, que movimenta a extremidade do corpo de prova (c) impactada para baixo através da torre DCB dinâmica (d), e move a extremidade engastada para a esquerda através do dispositivo ELS convencional (e). O corpo de prova continua a defletir até que o pino de carga atinge o amortecedor de impacto (f). O evento de carga de impacto é registrado pela célula de carga (g) e a deflexão e propagação da trinca pela câmera de alta velocidade (h). O esquema do dispositivo ELS modificado é apresentado na Figura 29.

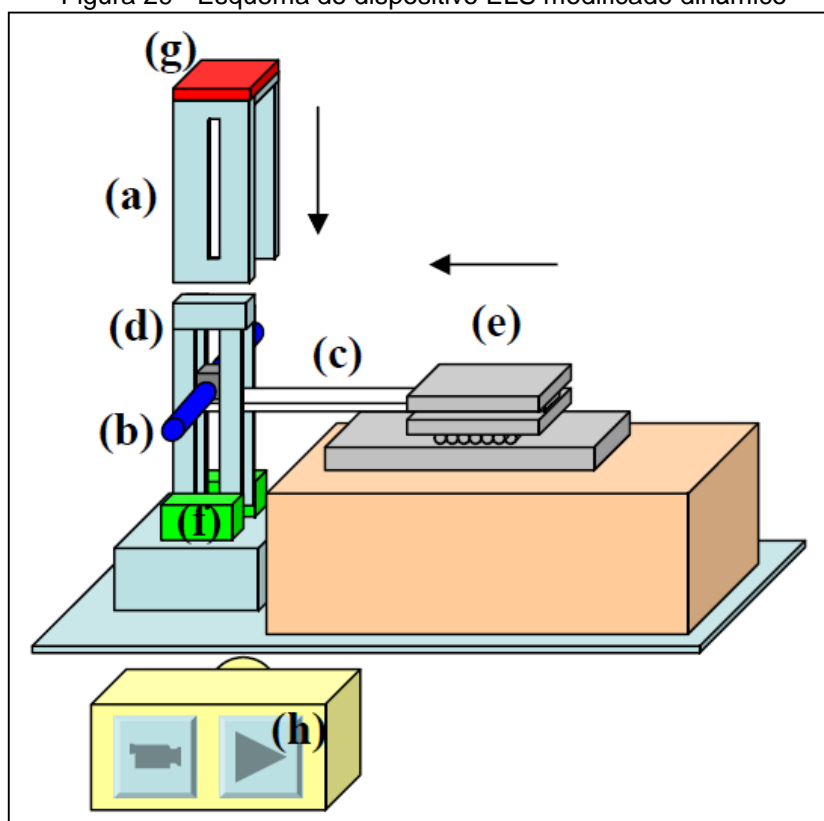
O registro da carga foi feito por uma célula de carga de 20 kN, o registro do deslocamento vertical foi feito por uma câmera de alta velocidade Photron 1024PCI com uma resolução padrão de 256x256 pixels para aquisição de 6000-10000 fps, e o registro da propagação da trinca por uma câmera Photron SA1 com uma alta resolução de 1024x896 pixels para 6250 fps.

Figura 28 - Montagem do dispositivo ELS modificado



Fonte- VERDIERE (2009)

Figura 29 - Esquema do dispositivo ELS modificado dinâmico



Fonte- VERDIERE (2009)

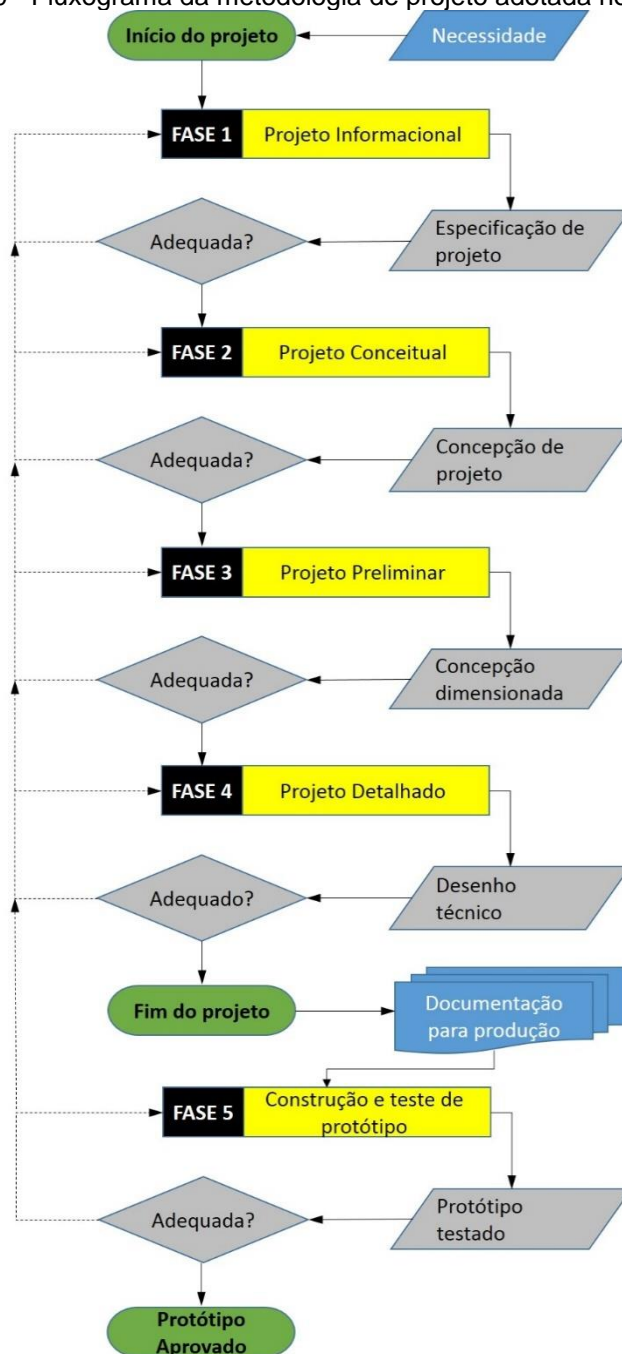
## CAPÍTULO III

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Metodologia de Projeto

A metodologia utilizada para o desenvolvimento de dispositivos para estudo de fratura interlaminar modo-I e modo-II de materiais dissimilares é mostrada na Figura 30.

Figura 30 - Fluxograma da metodologia de projeto adotada no trabalho.



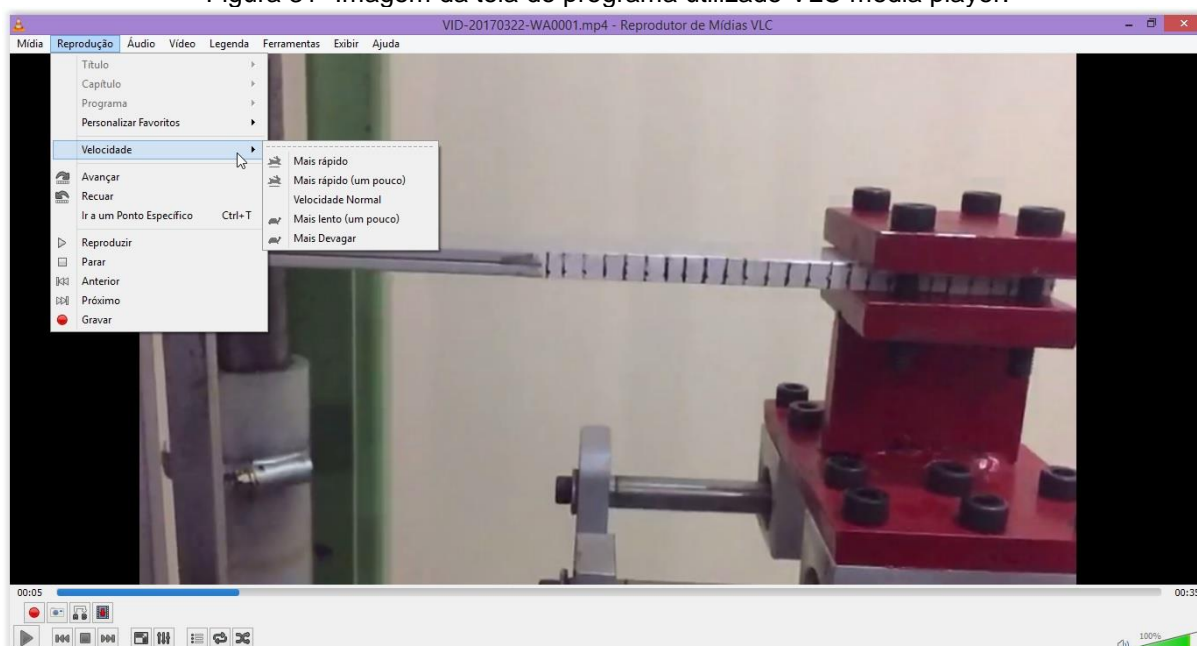
Fonte- Adaptado de MARIBONDO (2000)

- Definição do Problema (Projeto Informacional): é a interpretação e a limitação dos requisitos disponíveis de forma clara e objetiva. Para tanto, reuniram-se todas as possíveis informações necessárias ao desenvolvimento do trabalho, realizando levantamento em revistas e livros especializados, levantamento de dispositivos já existentes focalizando os aspectos funcionais e de projeto. Foi realizada uma pesquisa buscando informações referentes aos requisitos do projeto do dispositivo a ser desenvolvido.
- Projeto Conceitual: busca-se apresentar na forma de croquis, diagramas, protótipos funcionais, desenhos esquemáticos a visualização da(s) ideia(s) que melhor atendem à demanda de projeto;
- Projeto Preliminar: Configurar desenhos da forma do produto, controlar e levantar defeitos e falhas, controlar problemas e custos, preparar lista de peças preliminares e documentos de fabricação;
- Projeto Detalhado: finalizar os detalhes, desenhos de fabricação e documentos de fabricação e montagem;
- Construção do protótipo: faz-se uso dos recursos disponíveis em termos de fabricação e montagem, para a obtenção da forma física estabelecida e dimensionada nas fases anteriores;
- Teste do protótipo: realiza-se o teste das soluções propostas através de um raciocínio lógico, análise matemática, simulações computacionais e experimentos laboratoriais.

### **3.2 Metodologia de Filmagem**

Para o registro das imagens foi utilizada a câmera de um smartphone modelo IPHONE 6 PLUS, com resolução máxima de 3264 x 2448 pixels, para aquisição máxima de 240 quadros/s. As filmagens foram tratadas no software de edição de vídeo VLC media player, como mostrado na Figura 31, o qual possibilitou o acompanhamento do ensaio quadro a quadro.

Figura 31- Imagem da tela do programa utilizado VLC media player.



### 3.3 Fabricação dos corpos de prova

Para a realização dos ensaios de fratura interlaminar modo-I e modo-II, utilizando os dispositivos DCB e ELS, respectivamente, foram desenvolvidos corpos de prova fabricados em juntas adesivas. As juntas foram compostas por substratos de alumínio e colados com um adesivo epóxi.

Os substratos, que formam os corpos de prova, foram confeccionados a partir de barras chatas de alumínio de perfil 25,4 x 3,2 mm, cortadas cada uma com o comprimento de 250 mm. Foi realizado um tratamento superficial de abrasão nos substratos utilizando uma lixa de gramatura 220, para que haja melhor adesão entre o adesivo e os substratos do corpo de prova. Utilizou-se um adesivo epóxi da marca promabond hobby line para colagem dos substratos, e foi inserida uma fita antiaderente de PTFE entre os substratos dos corpos de prova, de modo a criar uma superfície não colada de 120 mm de comprimento, chamada de pré-trinca. E, por último, foi colado o bloco de carga ao corpo de prova, utilizando uma cola epóxi durepoxi líquido, da marca Loctite, conforme Figura 32. O bloco de carga foi confeccionado em alumínio, e possui dimensões de 32,0 x 26,0 x 30,0 mm, e possui um furo passante com o diâmetro de 9,6 mm, onde fica alojado o pino de carga.

Figura 32 – Imagem dos corpos de prova DCB fabricados.



## CAPÍTULO IV

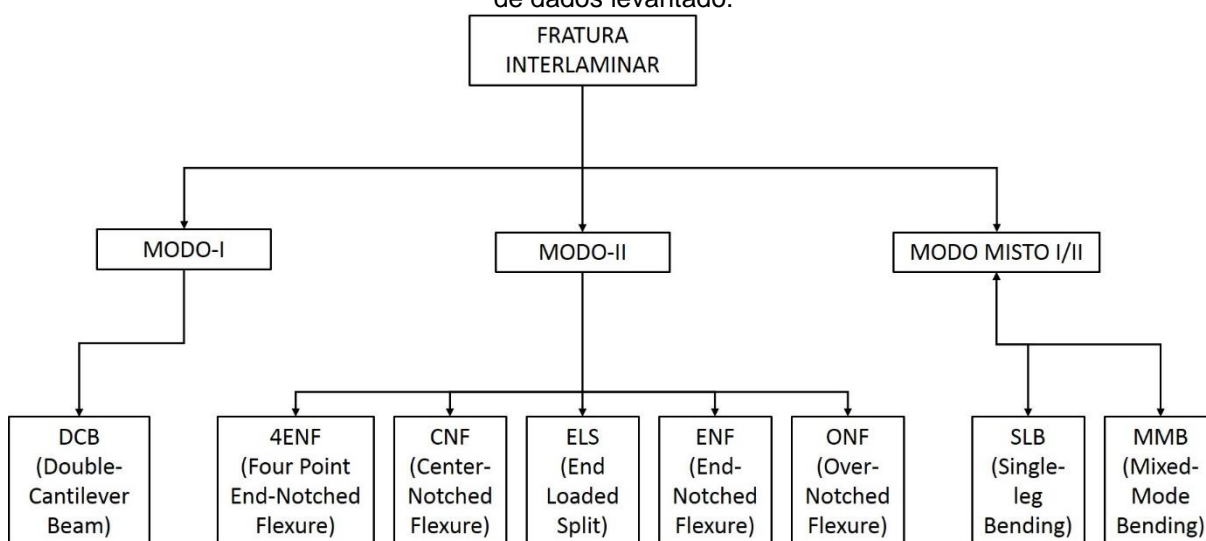
### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1 Projeto Informacional

O objetivo desse capítulo é demonstrar através de fluxograma e banco de dados como está dividida a área de estudo da fratura interlaminar em materiais dissimilares.

Para o desenvolvimento destes dispositivos para estudo de fratura interlaminar modo-I e modo-II para materiais dissimilares foram estudados diversos artigos científicos, dissertações de mestrado, teses de doutorado, normas técnicas, entre outros. O banco de dados levantado conta com 128 trabalhos acadêmicos que abordam os modos de fratura I, II e misto I/II, bem como os ensaios mais utilizados para a análise da fratura dos materiais. A Figura 33 mostra o esquema dos modos de fratura interlaminar e os tipos de ensaios relacionados a esses modos de fratura encontrados no banco de dados. Mostra-se no APÊNDICE A os quadros com informações de trabalhos acadêmicos como ano da publicação, nome do trabalho acadêmico, modos de fratura interlaminar, tipo de ensaio utilizado, e o nome dos autores.

Figura 33 - Esquema dos modos de fratura interlaminar e os tipos de ensaios encontrados no banco de dados levantado.

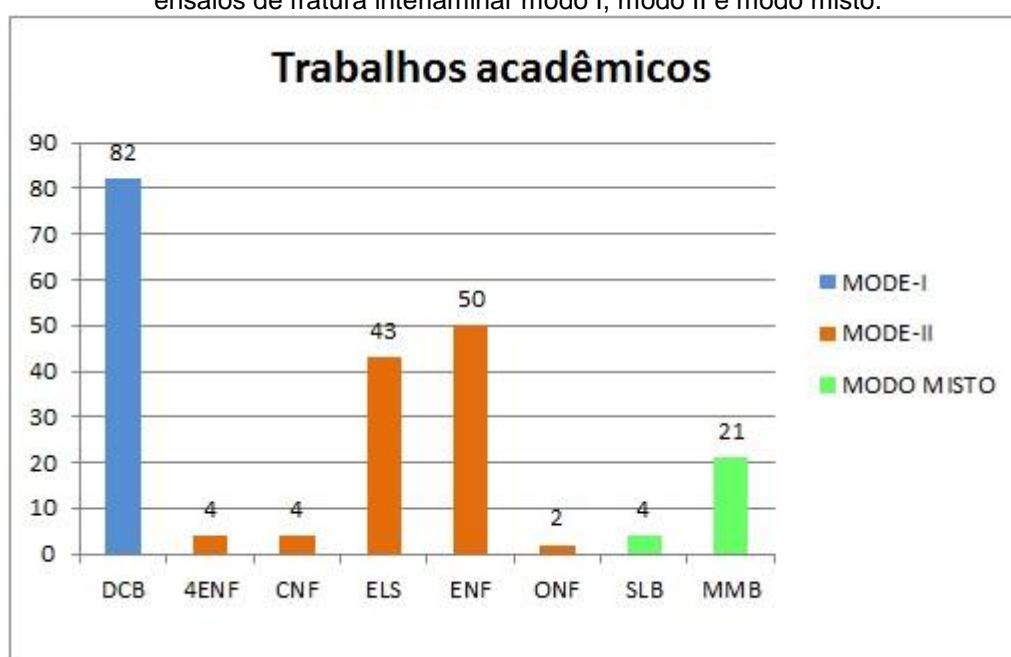


Com base no banco de dados analisado foi gerado a gráfico da Figura 34, onde se observa que dentre os 128 trabalhos acadêmicos analisados, o ensaio de fratura



interlaminar modo-I DCB (Double Cantilever Beam) possuiu 82 citações, sendo ele normatizado pela ASTM e ISO, para carregamento quase estático. Os tipos de ensaios de fratura interlaminar modo-II que mais foram encontrados na literatura foi o ensaio ENF (End-Notched Flexure), possuindo 50 citações e que é normatizada pela ASTM para carregamento quase-estático, e o ensaio ELS (End-Loaded Split), possuindo 43 citações, e que é normatizada pela ISO, quando submetido a carregamento quase estático.

Figura 34 – Quantidade de trabalhos acadêmicos encontrados no banco de dados que abordam os ensaios de fratura interlaminar modo I, modo II e modo misto.



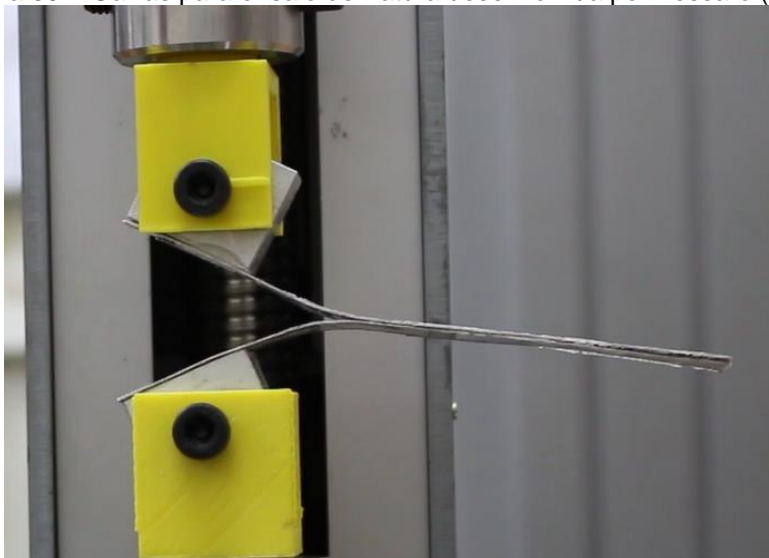
Após a análise dos trabalhos foi observado a falta de normatização para ensaios de fratura interlaminar dinâmico para materiais dissimilares, no entanto foi notado o surgimento de pesquisas de desenvolvimento de dispositivos que buscam suprir essa necessidade. Os ensaios mais utilizados em fratura interlaminar dinâmica é o modo I DCB e o modo II ELS. O trabalho acadêmico que se destaca é o de Verdiere (2009), da Universidade de Cranfield, onde a estrutura do dispositivo desenvolvida por ele é capaz de realizar o ensaio modo I DCB ou o modo II ELS, conforme foi mostrado na Figura 28 (pag. 38).

Com base nas informações levantadas foram escolhidos os tipos de dispositivos para serem desenvolvidos para reproduzir a fratura interlaminar modo I e

o modo II, que foram respectivamente, *Double Cantilever Beam* (DCB) e o *End-Loaded Split* (ELS).

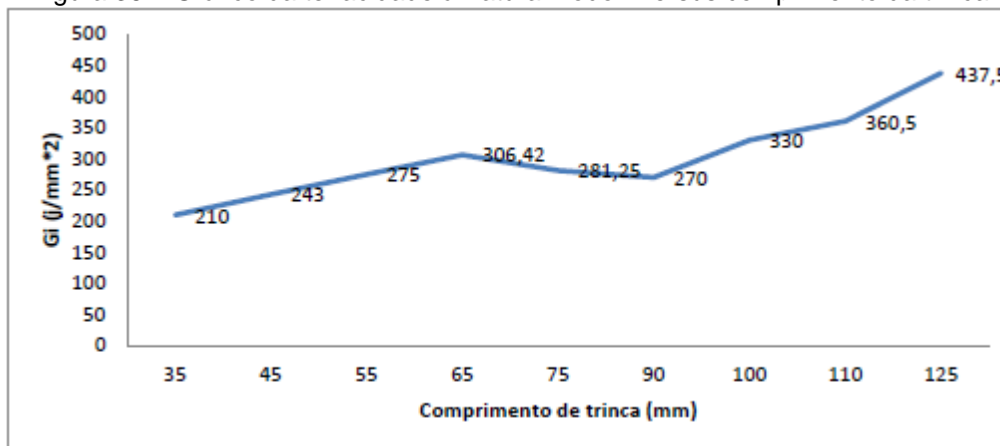
Outro resultado desse projeto informacional foi a produção do TCC de Cláudio Aragão Tessaro, o qual desenvolveu um dispositivo para ensaio de tenacidade à fratura interlaminar estático modo I DCB, conforme Figura 35, onde as garras que acoplam na Máquina de ensaio mecânico BMF 10 kN foram fabricadas por uma impressora 3D em material ABS, e os corpos de prova testados foram confeccionados em Chapas de alumínio de 0,5 mm colados com adesivo cianoacrilato. No seu trabalho foi possível gerar um gráfico de tenacidade à fratura versus comprimento da trinca, conforme Figura 36.

Figura 35 – Garras para ensaio de fratura desenvolvida por Tessaro (2016)



Fonte- TESSARO (2016)

Figura 36 – Gráfico da tenacidade à fratura modo-I versus comprimento da trinca.



Fonte- TESSARO (2016)

## 4.2 Projeto Conceitual

A partir dos estudos realizados em normas e dispositivos utilizados em outros trabalhos, entende-se que para efetuar o projeto dos dispositivos de fratura interlaminar dinâmica modo-I DCB e modo-II ELS, é de suma importância o estudo dos subsistemas que os compõe. Foi relacionado abaixo os subsistemas e os códigos de identificação de cada um.

- Dispositivo modo-I DCB dinâmico:
  1. Subsistema transmissão de carga (TC\_D)
  2. Subsistema alinhamento (AL\_D)
  3. Subsistema fixação do corpo de prova DCB (FCP\_D)
  4. Subsistema base de fixação (BF\_D)
  5. Subsistema carregamento (CAR\_D)
  
- Dispositivo modo-II ELS dinâmico
  1. Subsistema Transmissão de Carga (TC\_E)
  2. Alinhamento horizontal (AH\_E)
  3. Eixo guia horizontal (EG\_E)
  4. Alinhamento vertical (AV\_E)
  5. Subsistema de alojamento (AL\_E)
  6. Subsistema fixação do corpo de prova ELS (FCP\_E)
  7. Subsistema suporte de ligação (SL\_E)
  8. Subsistema estrutural ELS (EST\_E)
  9. Subsistema aplicação de carga ELS (AC\_E)
  10. Subsistema placa base (PB\_E)

### 4.2.1 Projeto Conceitual do Dispositivo Modo-I DCB Dinâmico

#### 4.2.1.1 Subsistema transmissão de carga (TC\_D)

Esse subsistema é formado por dois conjuntos, um que fica colado na superfície superior e outro na inferior da extremidade pré-trincada do corpo de prova, e tem a função de fazer a transmissão da carga recebida da máquina ao corpo de prova. A norma ASTM D5528-13 nos fornece dois exemplos, que são os blocos de carga e as dobradiças.

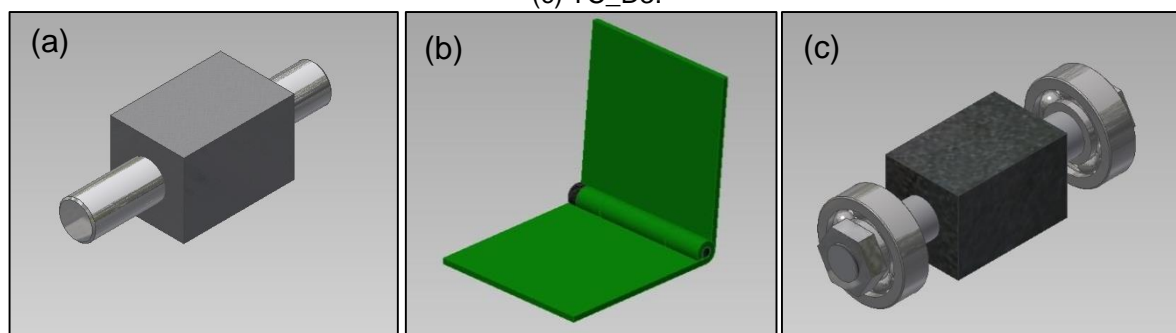
O princípio de solução TC\_D1, chamado na norma ASTM D5528-13 de bloco de carga, como mostrado na Figura 37a, consiste em um bloco retangular, geralmente

de alumínio, com um furo passante, onde fica inserido um pino de carga responsável pela transmissão de carga da máquina para o corpo de prova. É uma peça fácil de ser usinada.

O princípio de solução TC\_D2 é mostrado na Figura 37b, e também é fornecido pela norma ASTM D5528-13 com o nome de dobradiça. Estas dobradiças são vendidas comercialmente, e se necessário podem ser usinadas para terem suas dimensões ajustadas ao projeto.

O princípio de solução TC\_D3, mostrado na Figura 37c, foi adotado no dispositivo “Falling wedge” utilizado em Virginia Tech, e consiste em um bloco de alumínio com um furo passante, e um eixo inserido com rolamentos de esfera em cada extremidade. No ensaio realizado na Virginia Tech esse subsistema ficava alinhado na vertical com o corpo de prova, onde os rolamentos sofriam o impacto direto da cunha, e também serviam para reduzir o atrito entre a cunha de impacto e o bloco impactado.

Figura 37 – Princípios de solução dos subsistemas de transmissão de carga (a) TC\_D1, (b) TC\_D2 e (c) TC\_D3.

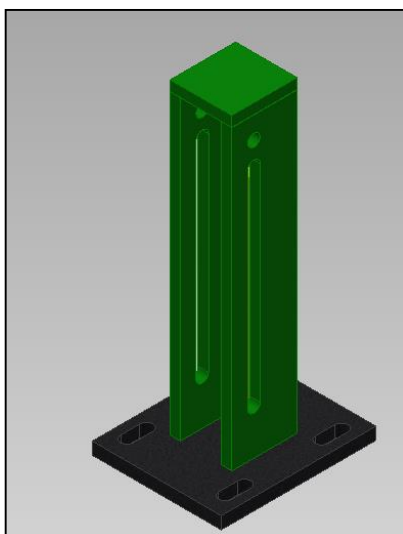


#### 4.2.1.2 Subsistema alinhamento (AL\_D)

Este subsistema não é encontrado em normas para ensaios dinâmicos, pois é um ensaio normatizado para testes DCB quase estático, onde é a própria máquina de ensaio de tração que oferece o alinhamento necessário para o teste.

O princípio de solução AL\_D1, mostrado na Figura 38, foi observado no ensaio realizado na Universidade de Cranfield, onde foi projetada uma torre com um furo superior para alojar o pino do bloco de carga superior, e rasgos laterais verticais por onde desliza o pino do bloco de carga inferior, oferecendo um bom alinhamento para o ensaio.

Figura 38 - Princípio de solução do subsistema alinhamento (AL\_D1)

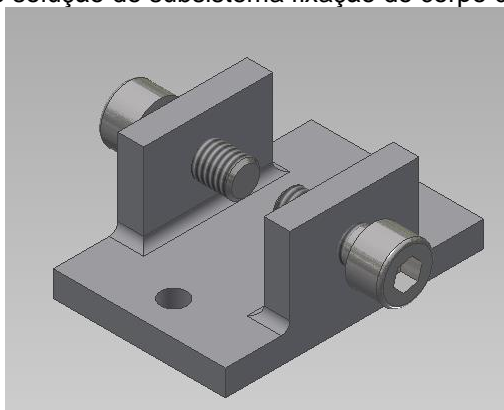


#### 4.2.1.3 Subsistema fixação do corpo de prova DCB (FCP\_D)

É responsável pela contenção do corpo de prova durante o ensaio, de modo a evitar qualquer instabilidade, desacoplamento ou dano ao mesmo.

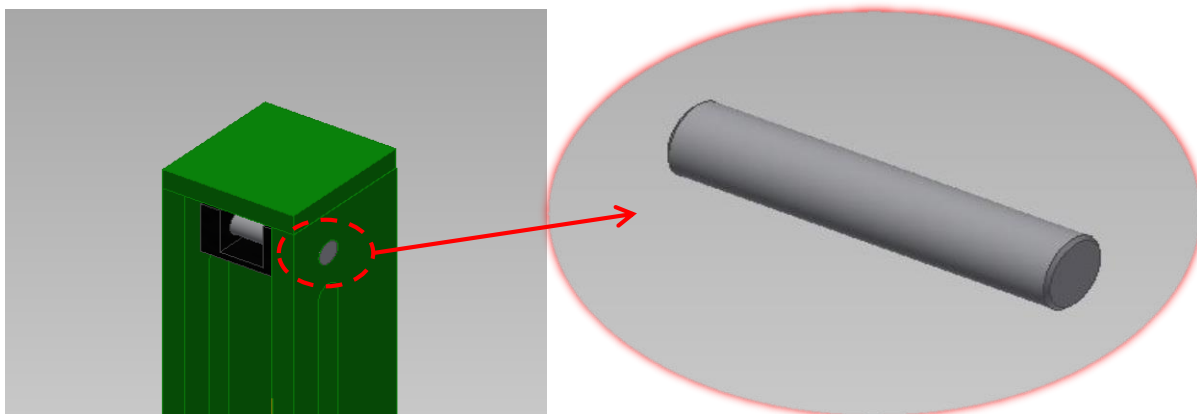
O princípio de solução FCP\_D1, mostrado na Figura 39, foi inspirado pelo método utilizado pela Virginia Tech, e se baseia em um bloco que fica fixado a base da máquina de impacto, o qual possui parafusos laterais que fixam o corpo de prova na posição vertical, evitando instabilidade durante o ensaio.

Figura 39 - Princípio de solução do subsistema fixação do corpo de prova DCB (FCP\_D1)



O princípio de solução FCP\_D2, mostrado na Figura 40, foi um jeito simples encontrado pela Universidade de Cranfield, onde é inserido um pino de mesma dimensão ou menor que a largura da torre DCB, evitando que fique saliente durante a queda dos garfos de ataque, e mantendo o corpo de prova fixo na parte superior, permitindo apenas o movimento de rotação.

Figura 40 - Princípio de solução do subsistema fixação do corpo de prova DCB 2 (FCP\_D2)

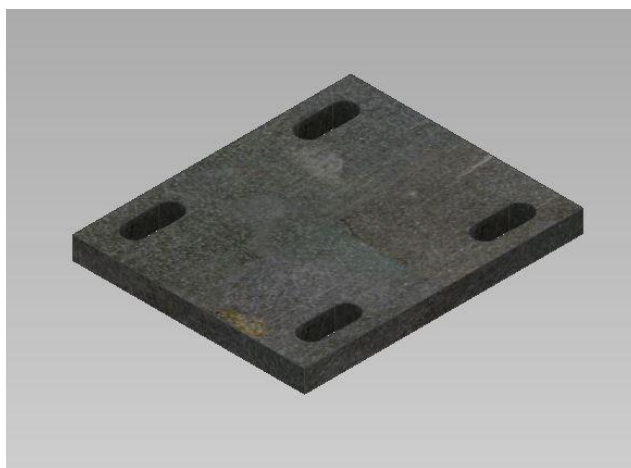


#### 4.2.1.4 Subsistema base de fixação (BF\_D)

É responsável por promover a sustentação da estrutura que prende o corpo de prova, e realizar a fixação do dispositivo à máquina de impacto.

O princípio de solução BF\_D1, mostrado na Figura 41, consiste em uma chapa de aço retangular que possui rasgos por onde passam os parafusos de fixação. Os rasgos possibilitam um melhor ajuste dimensional com a máquina de impacto.

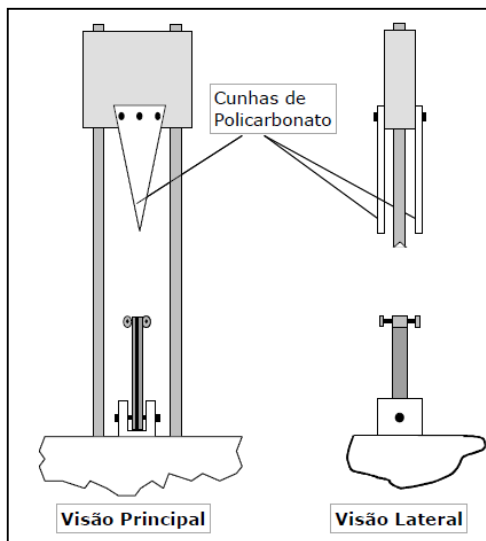
Figura 41 - Princípio de solução do subsistema base de fixação 1 (BF\_D1)



#### 4.2.1.5 Subsistema aplicação de carga (AC\_D)

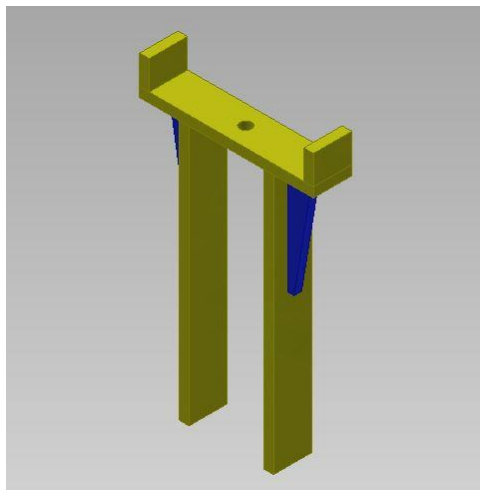
O princípio de solução AC\_D1, mostrado na Figura 42, foi adotado na Virginia Tech, onde foi utilizado as cunhas de 30° em forma de triângulo isósceles, como forma de guiar a divisão do corpo de prova ao ser impactado, e o repartia de forma igual para os dois lados bipartidos, promovendo o tipo de fratura modo-I.

Figura 42 - Configuração do subsistema aplicação de carga 1 (AC\_D1)



O princípio de solução AC\_D2, mostrado na Figura 43, foi utilizado na Universidade de Cranfield, ele consiste em um impactador composto por dois garfos de ataque que são ligados aos pesos da máquina de impacto, e ao serem liberados atingem as duas extremidades do pino de carga inferior simultaneamente.

Figura 43 - Princípio de solução do subsistema aplicação de carga 2 (AC\_D2)



#### 4.2.1.6 Definição das configurações do dispositivo Modo-I DCB Dinâmico

Definidos os subsistemas que compõem o dispositivo modo-I DCB dinâmico, foi gerada uma matriz morfológica, contendo a definição dos subsistemas e princípios de solução levantados. A escolha dos princípios de solução foi feita de acordo com o que melhor se adequa ao projeto, como mostra o Quadro 1.

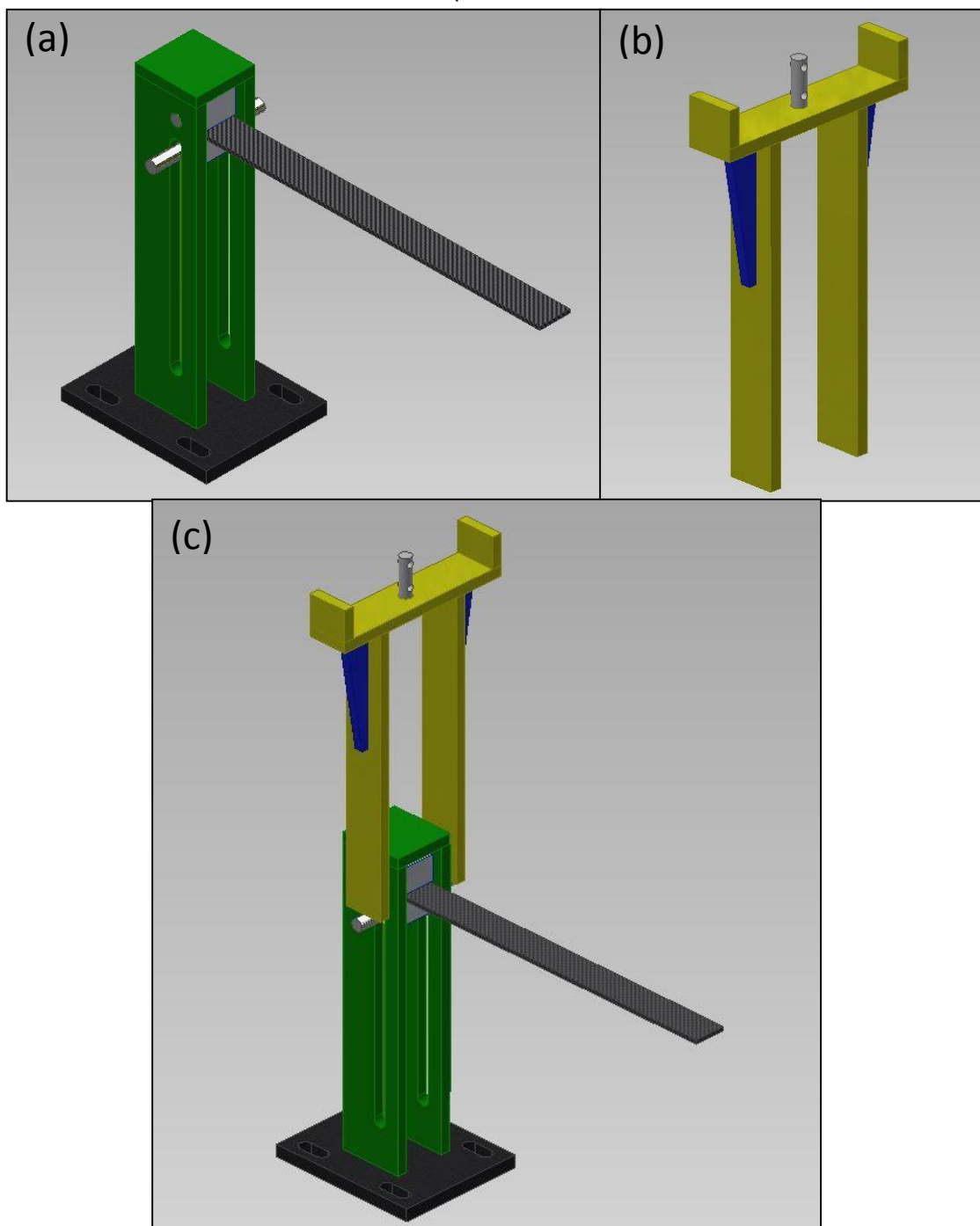
Quadro 1 - Matriz morfológica com os princípios de solução escolhidos para o dispositivo Modo-I DCB Dinâmico

| Tipo de ensaio       | Dispositivo         | Subsistema                               | Princípios de Solução |        |       |
|----------------------|---------------------|--|-----------------------|--------|-------|
| Fratura Interlaminar | Modo-I DCB Dinâmico | Subsistema transmissão de carga          | TC_D1                 | TC_D2  | TC_D3 |
|                      |                     | Subsistema alinhamento                   | AL_D1                 |        |       |
|                      |                     | Subsistema fixação do corpo de prova DCB | FCP_D1                | FCP_D2 |       |
|                      |                     | Subsistema base de fixação               | BF_D1                 |        |       |
|                      |                     | Subsistema aplicação de carga            | AC_D1                 | AC_D2  |       |

A configuração de matriz morfológica escolhida foi TC\_D1, AL\_D1, FCP\_D2, BF\_D1 e AC\_D2, conforme mostrado no desenho da Figura 44. Esta configuração foi escolhida para a confecção de um “Protótipo funcional”, ou seja, um modelo em escala real, para que se for necessário a mudança de algum princípio de solução possa ser feita antes da fabricação do protótipo.



Figura 44 – Princípios de solução do dispositivo DCB, separado em (a) torre DCB; (b) impactador; (c) e dispositivo DCB



#### 4.2.2 Projeto Conceitual do Dispositivo Modo-II ELS Dinâmico

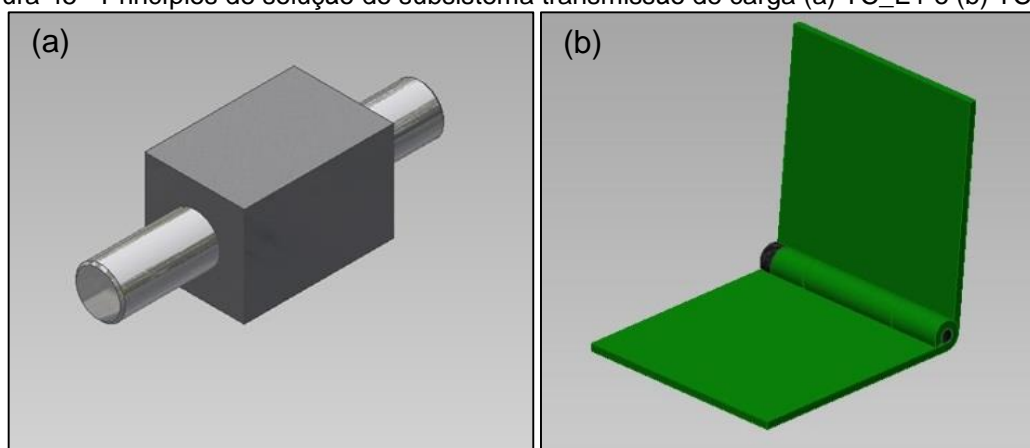
##### 4.2.2.1 Subsistema Transmissão de Carga (TC\_E)

Esse subsistema é ligado à superfície superior da extremidade pré-trincada do corpo de prova, e tem a função de fazer a transmissão da carga recebida da máquina ao corpo de prova.

O princípio de solução TC\_E1, mostrado na Figura 45a, consiste em um bloco retangular, geralmente de alumínio, com um furo passante, e um pino de carga alojado, responsável pela transmissão de carga da máquina para o bloco de carga. É uma peça fácil de ser usinada.

O princípio de solução TC\_E2, mostrado na Figura 45b, tem o nome de dobradiça, e é composta por duas abas e um pino de ligação. Uma aba é colada ao corpo de prova e a outra acoplada à máquina de ensaio. Estas dobradiças são vendidas comercialmente, e se necessário podem ser usinadas para terem suas dimensões ajustadas ao projeto.

Figura 45 - Princípios de solução do subsistema transmissão de carga (a) TC\_E1 e (b) TC\_E2.



#### 4.2.2.2 Alinhamento horizontal (AH\_E)

Os ensaios de tenacidade à fratura interlaminar modo-II ELS dinâmico encontrados na literatura aparecem com o suporte de fixação do corpo de prova fixo ou com deslocamento horizontal. Esse subsistema alinhamento horizontal apresenta princípios de solução para o caso de escolha de um dispositivo ELS com suporte de fixação do corpo de prova que apresente deslocamento horizontal.

O princípio de solução AH\_E1, mostrado na Figura 46a, foi utilizado no dispositivo ELS da Universidade de Dublin, e consiste em um patim com deslizamento por pistas de esfera, oferece flange que permite a fixação com a estrutura desejada através de parafusos. Este produto permite o suporte a alta capacidade de carga, com redução de folga.

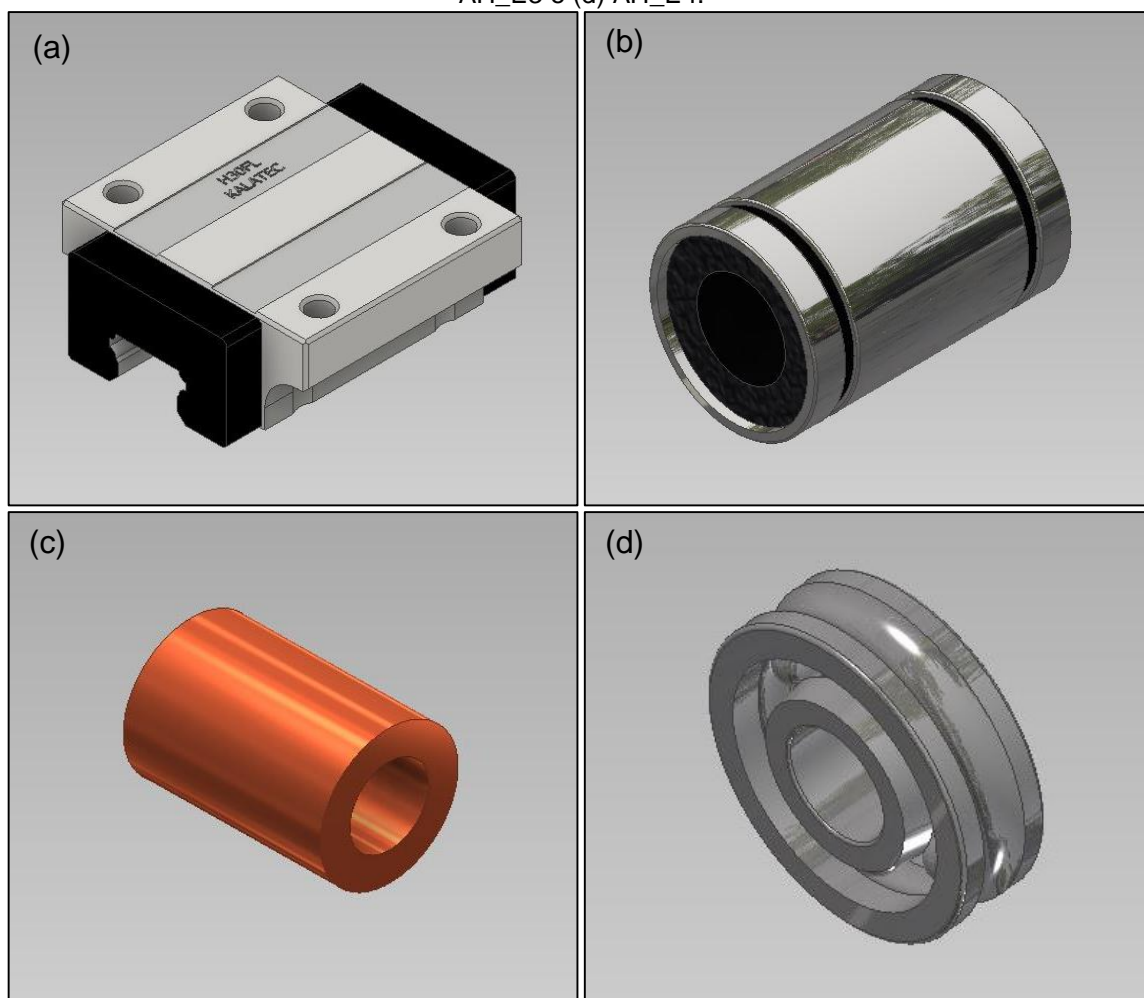
O princípio de solução AH\_E2, mostrado na Figura 46b, consiste em um rolamento linear com pistas de aço temperado com raspadores, uma gaiola de esferas

polimérica e esferas retificadas. Apresenta baixo ruído e suporta cargas moderadas, geralmente aconselha utilizar no mínimo dois por eixo.

O princípio de solução AH\_E3, mostrado na Figura 46c, consiste em buchas de bronze. Elas suportam cargas elevadas, possuem boa resistência à corrosão, boas propriedades de atrito e desgaste, e são autolubrificantes.

O princípio de solução AH\_E4, mostrado na Figura 46d, consiste em rolamentos de esfera com rasgos em forma de “U” no anel externo, por onde se desloca sobre um eixo cilíndrico em aço retificado. Para manter um bom alinhamento é necessário no mínimo dois pares de rolamento, dois em cada lado do guia.

Figura 46 - Princípios de solução do subsistema alinhamento horizontal (a) AH\_E1, (b) AH\_E2, (c) AH\_E3 e (d) AH\_E4.



#### 4.2.2.3 Eixo guia horizontal (EG\_E)

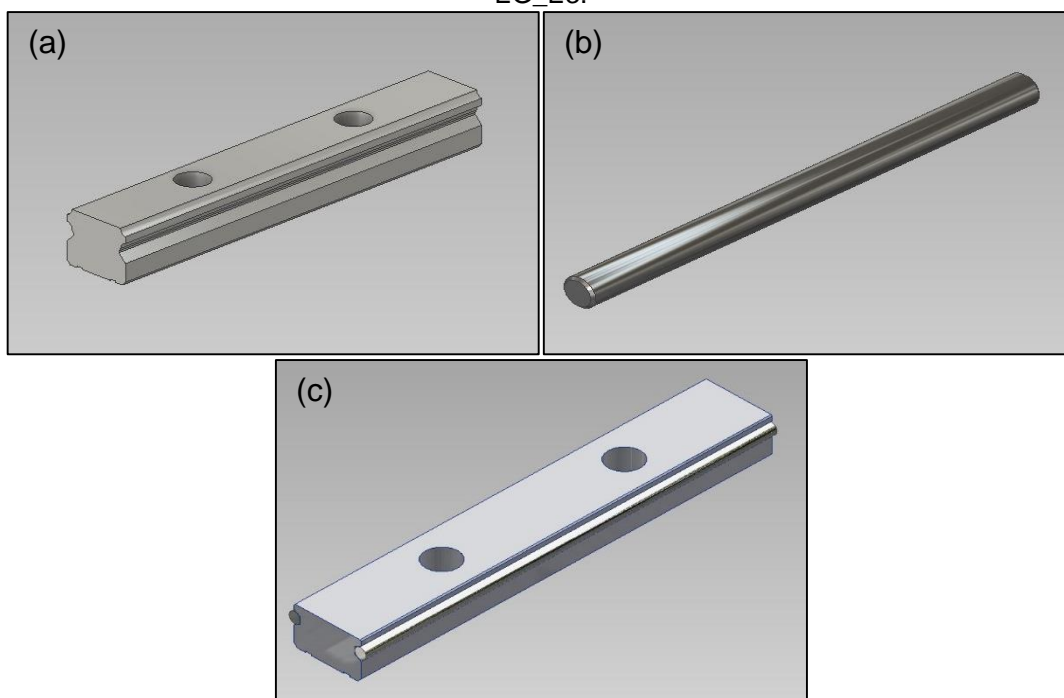
Esse subsistema serve de guia para o subsistema alinhamento horizontal, e necessita de um bom ajuste dimensional e considerável dureza superficial.

A solução EG\_E1, mostrada na Figura 47a, é utilizada no trabalho da Universidade de Dublin, onde é projetado para que o subsistema alinhamento horizontal 1 (AH\_E1) deslize sobre o seu perfil.

O princípio de solução EG\_E2, mostrado na Figura 47b, foi utilizado no dispositivo ELS do EMPA, consiste em eixos cilíndricos retificados por onde pode correr um rolamento linear ou uma bronzina.

O princípio EG\_E3, mostrado na Figura 47c, consiste em uma base em duralumínio acoplado a dois eixos laterais de aço retificado, por onde deslizam os rolamentos com rasgos em “U” (AH\_E4).

Figura 47 - Princípios de solução do subsistema eixo guia horizontal (a) EG\_E1, (b) EG\_E2 e (c) EG\_E3.

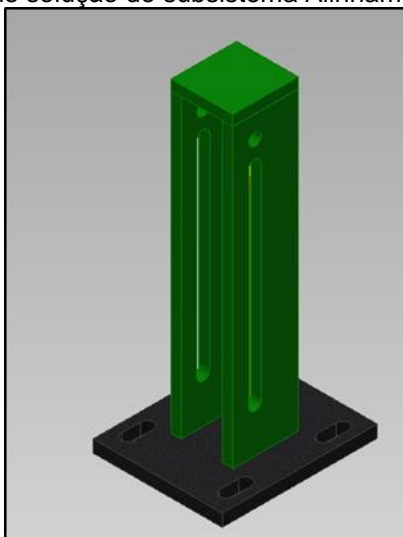


#### 4.2.2.4 Alinhamento vertical (AV\_E)

Tem como finalidade garantir que, ao sofrer o impacto, a extremidade pré-trincada seguirá uma trajetória vertical.

O princípio de solução AV\_E1, mostrado na Figura 48, foi utilizado no ensaio realizado na Universidade de Southampton, e consiste em uma torre com rasgos laterais verticais por onde desliza o item proposto TC\_E1, oferecendo um bom alinhamento para o ensaio.

Figura 48 - Princípio de solução do subsistema Alinhamento vertical 1 (AV\_E1)



#### 4.2.2.5 Subsistema de Alojamento (AL\_E)

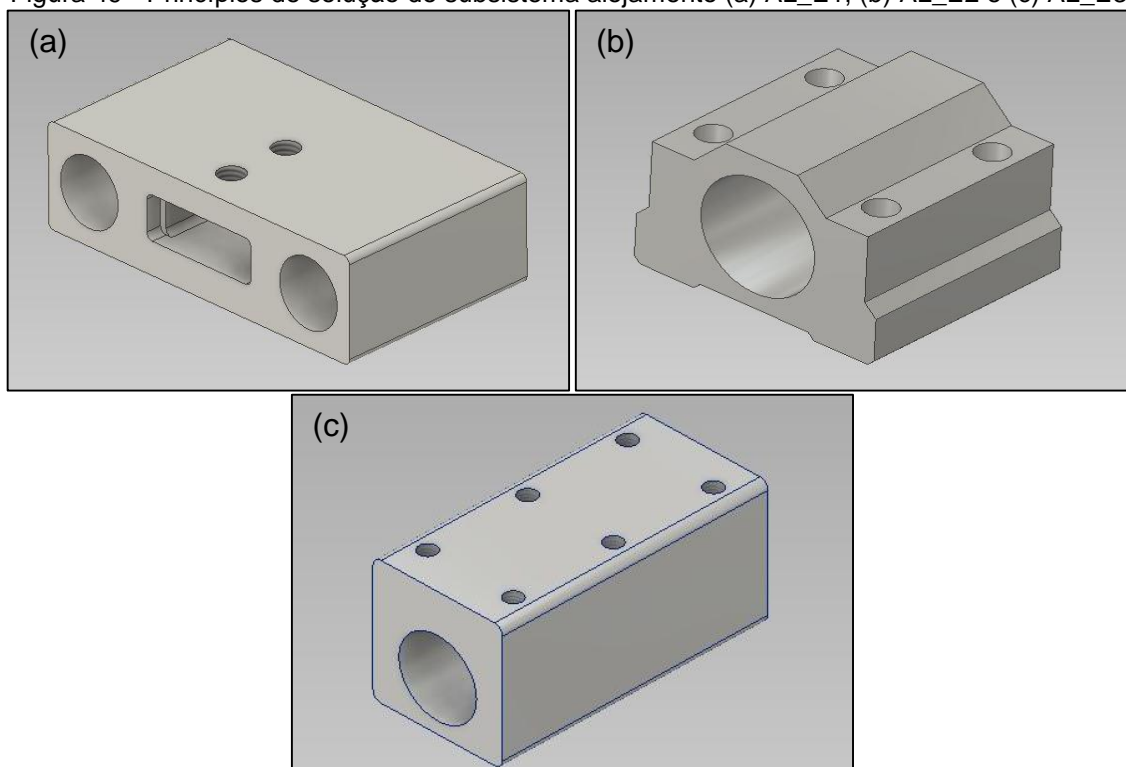
Esse subsistema é responsável pelo alojamento dos itens propostos AH\_E2 e AH\_E3, do subsistema alinhamento horizontal.

O princípio de solução AL\_E1, mostrado na Figura 49a, foi utilizado no dispositivo ELS do EMPA, que consiste em um bloco maciço com dois furos passantes para alojar rolamento linear ou bucha de bronze. Nota-se que, no próprio bloco é usinado um rasgo retangular passante, que é responsável pela fixação do corpo de prova, e que também dispensa a necessidade de utilizar o subsistema suporte de ligação, pois o seu bloco usinado já faz essa função.

O princípio de solução AL\_E2, mostrado na Figura 49b, é oferecido comercialmente com o nome “*pillow block*”, consiste em um bloco de alumínio com um furo passante para alojamento de rolamento linear, e furos para fixação no suporte de ligação, por parafusos.

O princípio de solução AL\_E3, mostrado na Figura 49c, concebida consiste em um bloco de alumínio de perfil quadrado, onde é aberto um furo descentralizado para alojamento do rolamento linear. Em sua superfície superior há furos para fixação no suporte de ligação.

Figura 49 - Princípios de solução do subsistema alojamento (a) AL\_E1, (b) AL\_E2 e (c) AL\_E3.



#### 4.2.2.6 Subsistema fixação do corpo de prova ELS (FCP\_E)

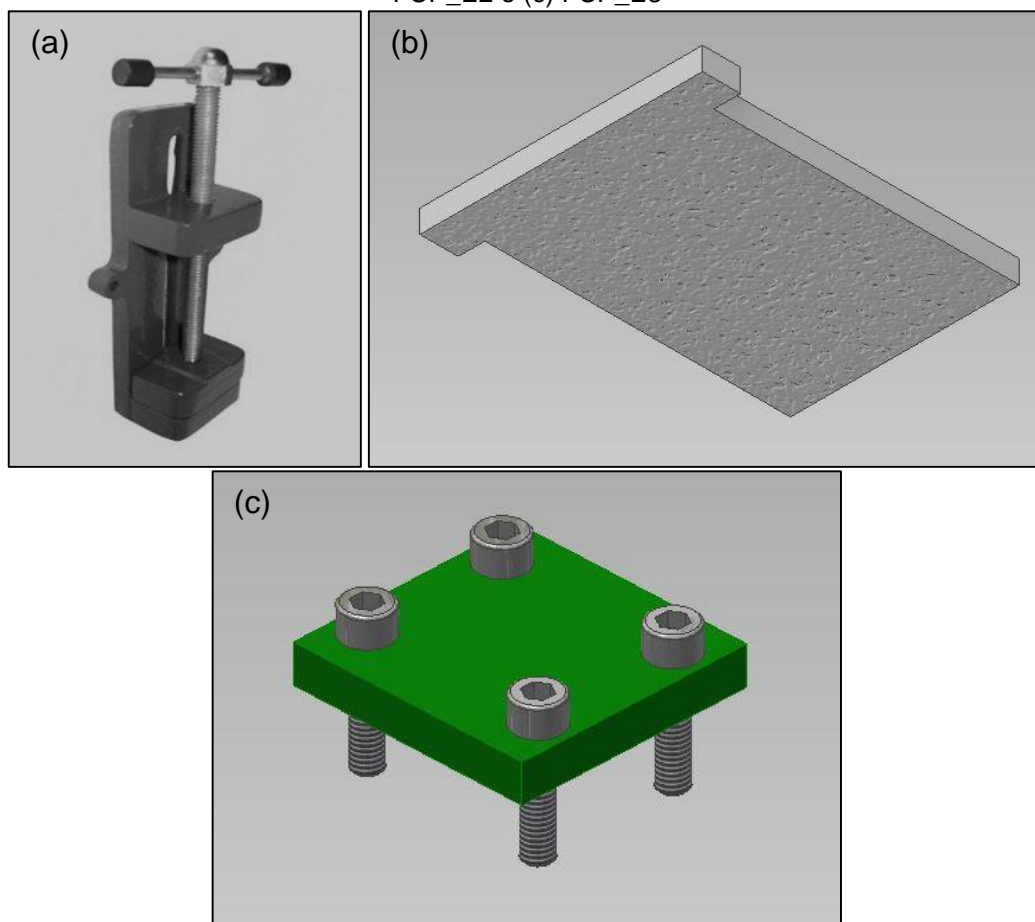
Esse subsistema é responsável pela fixação da extremidade não trincada do corpo de prova, e foi desenvolvido com base nas soluções oferecidas nos trabalhos analisados no projeto preliminar.

A concepção FCP\_E1, mostrada na Figura 50a, foi inspirada no dispositivo ELS utilizado pela Virginia Tech, que utilizou uma morsa adaptada a sua estrutura para efetuar a fixação do corpo de prova.

A concepção FCP\_E2, mostrada na Figura 50b, foi projetada para ser usada no item AL\_E1, e consiste em uma placa de alumínio com batentes, a qual é inserida no rasgo do bloco, onde fica posicionada acima do corpo de prova, para que o aperto dos parafusos seja feito na placa e não diretamente no corpo de prova, evitando o dano.

A concepção FCP\_E3, mostrada na Figura 50c, foi baseada no dispositivo apresentado pela Universidade de Southampton, que apresenta uma chapa quadrada parafusada utilizada para prender o corpo de prova.

Figura 50 - Princípios de solução do subsistema fixação do corpo de prova ELS (a) FCP\_E1, (b) FCP\_E2 e (c) FCP\_E3



#### 4.2.2.7 Subsistema suporte de ligação (SL\_E)

Este subsistema é responsável por promover a ligação entre o subsistema fixação do corpo de prova (FCP\_E) e o subsistema de alojamento (AL\_E).

A solução SL\_E1, mostrada na Figura 51a, foi concebida para unir o item alojamento 2 (AL\_E2) e o item fixação do corpo de prova 3 (FCP\_E3).

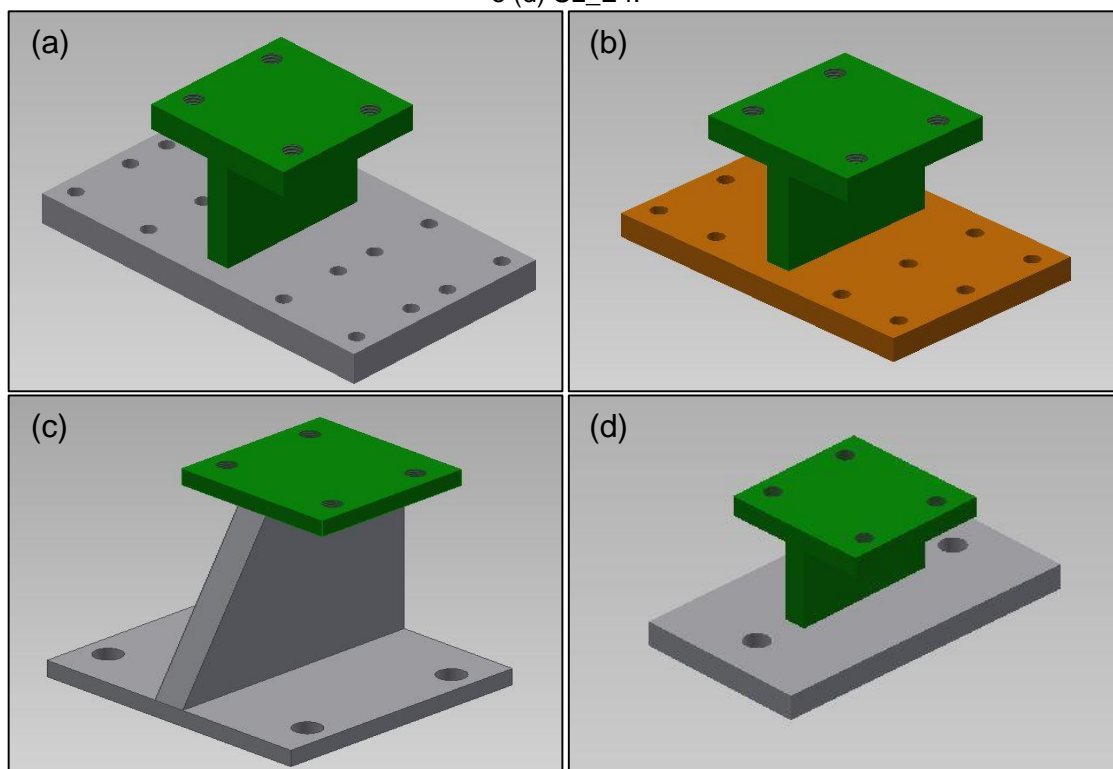
A solução SL\_E2, mostrada na Figura 51b, foi concebida para unir o item alojamento 3 (AL\_E3) e o item fixação do corpo de prova 3 (FCP\_E3).

A concepção SL\_E3, mostrada na Figura 51c, foi concebida para unir o item alinhamento horizontal 1 (AH\_E1) e o item fixação do corpo de prova 3 (FCP\_E3).

A concepção SL\_E4, mostrada na Figura 51d, foi concebida para unir o item eixo guia horizontal 3 (EG\_E3) e o item fixação do corpo de prova 3 (FCP\_E3).



Figura 51 - Princípios de solução do subsistema suporte de ligação (1) SL\_E1, (b) SL\_E2, (c) SL\_E3 e (d) SL\_E4.

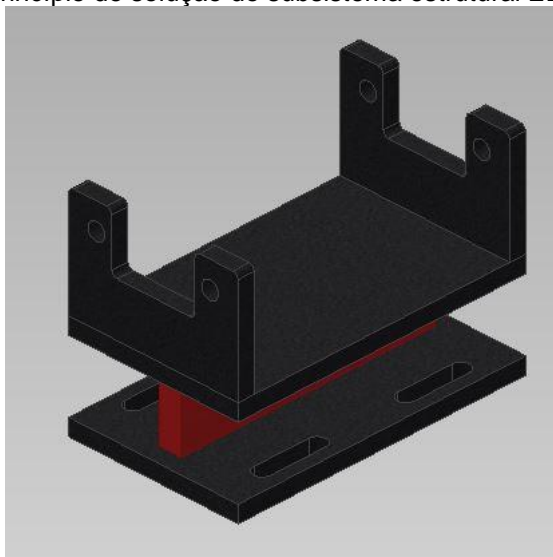


#### 4.2.2.8 Subsistema estrutural ELS (EST\_E)

Este subsistema é responsável pela fixação dos eixos guias (AG\_E2), de promover estabilidade estrutural, e o ajuste da estrutura através de parafuso sobre os rasgos da base.

A solução concebida (EST\_E1), mostrada na Figura 52, foi projetada para fixar os eixos guias (AG\_E2), responsáveis pelo movimento vertical.

Figura 52 - Princípio de solução do subsistema estrutural ELS 1 (EST\_E1)



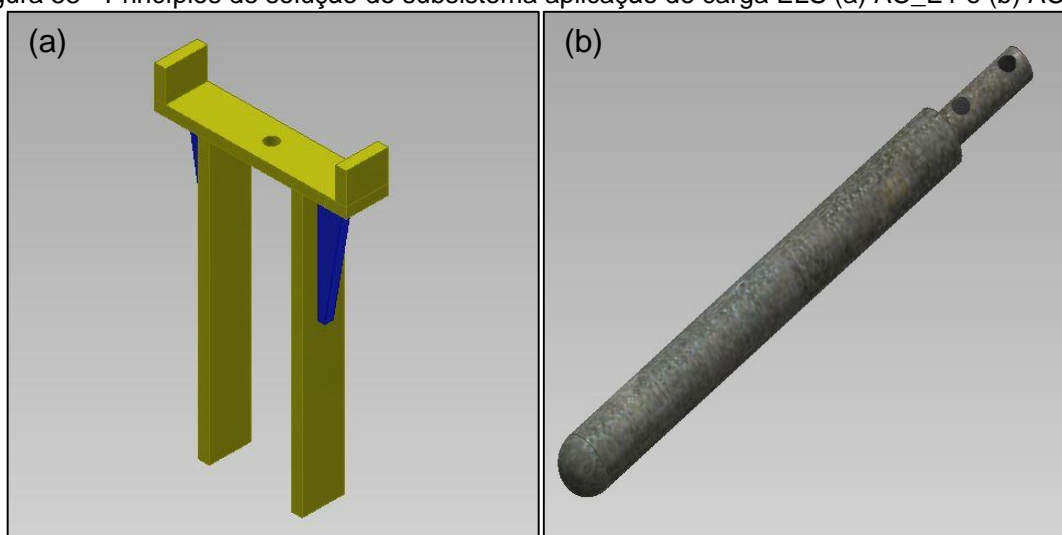


#### 4.2.2.9 Subsistema aplicação de carga ELS (AC\_E)

A concepção AC\_E1, mostrada na Figura 53a, consiste em um impactador composto por dois garfos de ataque que são ligados aos pesos da máquina de impacto, e ao serem liberados atingem as duas extremidades do pino de carga inferior simultaneamente, movimentando a extremidade do corpo de prova no sentido para baixo.

O princípio de solução AC\_E2, mostrada na Figura 53b, foi utilizado no dispositivo ELS da Virginia Tech, e consiste em um impactador cilíndrico de extremidade hemisférica, que ao ser liberado atinge a extremidade pré-trincada do corpo de prova.

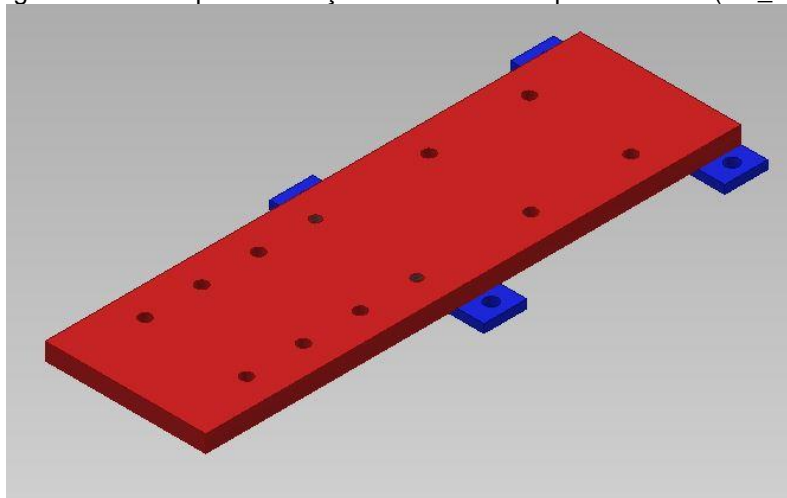
Figura 53 - Princípios de solução do subsistema aplicação de carga ELS (a) AC\_E1 e (b) AC\_E2



#### 4.2.2.10 Subsistema placa base (PB\_E)

A concepção PB\_E1, mostrada na Figura 54, apresenta o princípio de solução encontrado para realizar a fixação do item Alinhamento vertical 1 (AV\_E1) e o item estrutural 1 (EST\_E1), em uma mesma base. A concepção apresenta duas placas com furo de fixação, em cada uma.

Figura 54 - Princípio de solução do subsistema placa base 1 (PB\_E1)



#### **4.2.2.11 Definição das configurações do dispositivo Modo-II ELS Dinâmico**

Definidos os subsistemas que compõem o dispositivo modo-II ELS dinâmico, foi gerada uma matriz morfológica e escolhido os princípios de solução que melhor se adequam ao projeto, como mostra o

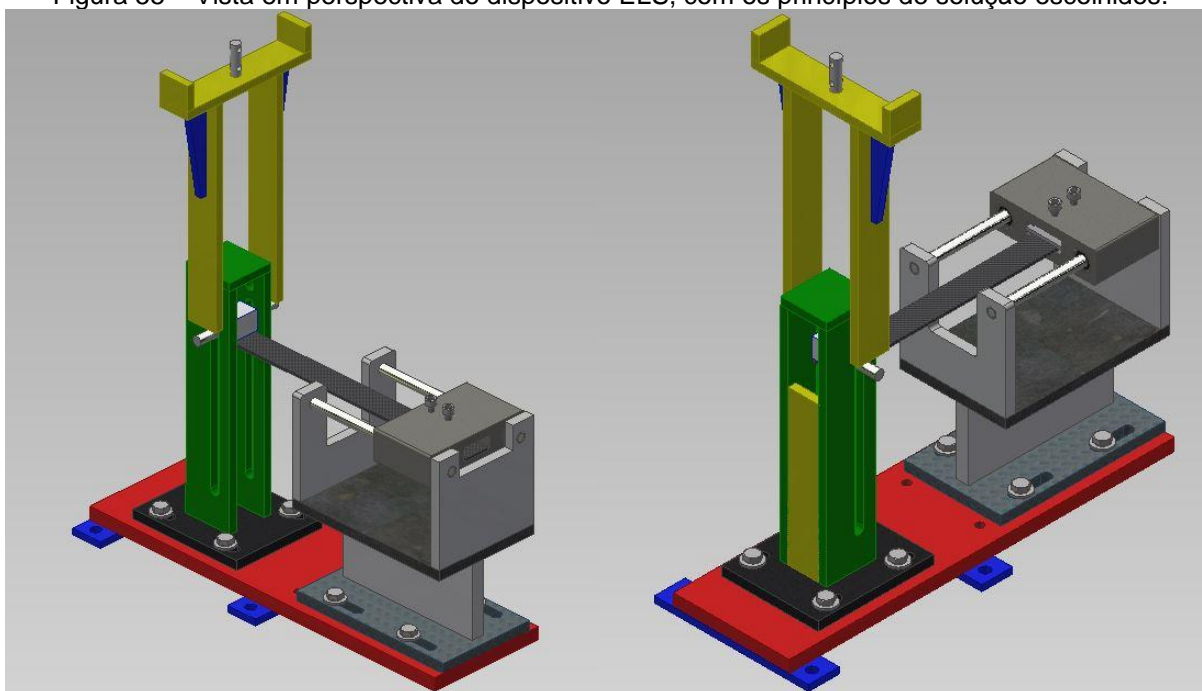
Quadro 2.

Quadro 2 - Matriz morfológica com os princípios de solução escolhidos para o dispositivo Modo-II ELS Dinâmico.

| Tipo de ensaio       | Dispositivo          | Subsistema                               | Princípios de Solução |        |        |       |
|----------------------|----------------------|--|-----------------------|--------|--------|-------|
| Fratura Interlaminar | Modo-II ELS Dinâmico | Subsistema Transmissão de Carga          | TC_E1                 | TC_E2  |        |       |
|                      |                      | Alinhamento horizontal                   | AH_E1                 | AH_E2  | AH_E3  | AH_E4 |
|                      |                      | Eixo guia horizontal                     | EG_E1                 | EG_E2  | EG_E3  |       |
|                      |                      | Alinhamento vertical                     | AV_E1                 |        |        |       |
|                      |                      | Subsistema de alojamento                 | AL_E1                 | AL_E2  | AL_E3  |       |
|                      |                      | Subsistema fixação do corpo de prova ELS | FCP_E1                | FCP_E2 | FCP_E3 |       |
|                      |                      | Subsistema suporte de ligação            | SL_E1                 | SL_E2  | SL_E3  | SL_E4 |
|                      |                      | Subsistema estrutural ELS                | EST_E1                |        |        |       |
|                      |                      | Subsistema aplicação de carga ELS        | AC_E1                 | AC_E2  |        |       |
|                      |                      | Subsistema placa base                    | PB_E1                 |        |        |       |

A configuração de matriz morfológica escolhida foi TC\_E1, AH\_E2, EG\_E2, AV\_E1, AL\_E1, FCP\_E2, EST\_E1, AC\_E1 e PB\_E1, como mostrada no desenho da Figura 55. O item subsistema de ligação não precisou ser escolhido, pois o item alojamento 1 (AL\_E1) desempenha a sua função. Esta configuração foi escolhida para a confecção de um “Protótipo funcional”, e que se for necessário a mudança de algum princípio de solução possa ser feita antes da fabricação do protótipo.

Figura 55 – Vista em perspectiva do dispositivo ELS, com os princípios de solução escolhidos.



### 4.3 Protótipo Funcional

Protótipo funcional é um protótipo do produto que possui algumas das funcionalidades do produto original e que permite uma interação, mesmo que simulada, destas funcionalidades.

O protótipo funcional é uma ferramenta que tem sido utilizada na fase conceitual de desenvolvimento de produtos, e tem sido essencial para avaliação e validação de projetos de dispositivos.

Após a realização do projeto conceitual, divisão dos subsistemas e a escolha dos princípios de funcionamento que possam compor os dispositivos modo-I DCB e modo-II ELS dinâmicos, foram confeccionados protótipos funcionais para simular situações de uso e aspectos morfológicos similares aos determinados no projeto.

Os protótipos funcionais dos dispositivos DCB e ELS foram confeccionados em MDF, por uma empresa de Campina Grande chamada Mizanne Atelier, utilizando a técnica de corte a laser, em uma máquina CNC, pois é um processo de fabricação rápido, e principalmente por oferecer qualidade e precisão no corte.

#### 4.3.1 Protótipo funcional do Dispositivo Modo-I DCB Dinâmico

Para a confecção do protótipo funcional do dispositivo modo-I DCB dinâmico foi preciso realizar algumas modificações na estrutura original do projeto, pois é

necessário acrescentar furações e encaixes para fixação de uma peça na outra. O protótipo funcional foi construído a partir de placas em mdf com espessuras de 3 e 6 mm, e quando era necessária uma espessura maior, colava-se uma peça sobre a outra, com o mesmo formato.

As Figuras 56 e 57 mostram respectivamente os subsistemas aplicação de carga 2 (AP\_D2) e alinhamento 1 (AL\_D1), após o corte a laser e a montagem.

Figura 56 – Protótipo funcional do subsistema aplicação de carga 2 (AP\_D2)

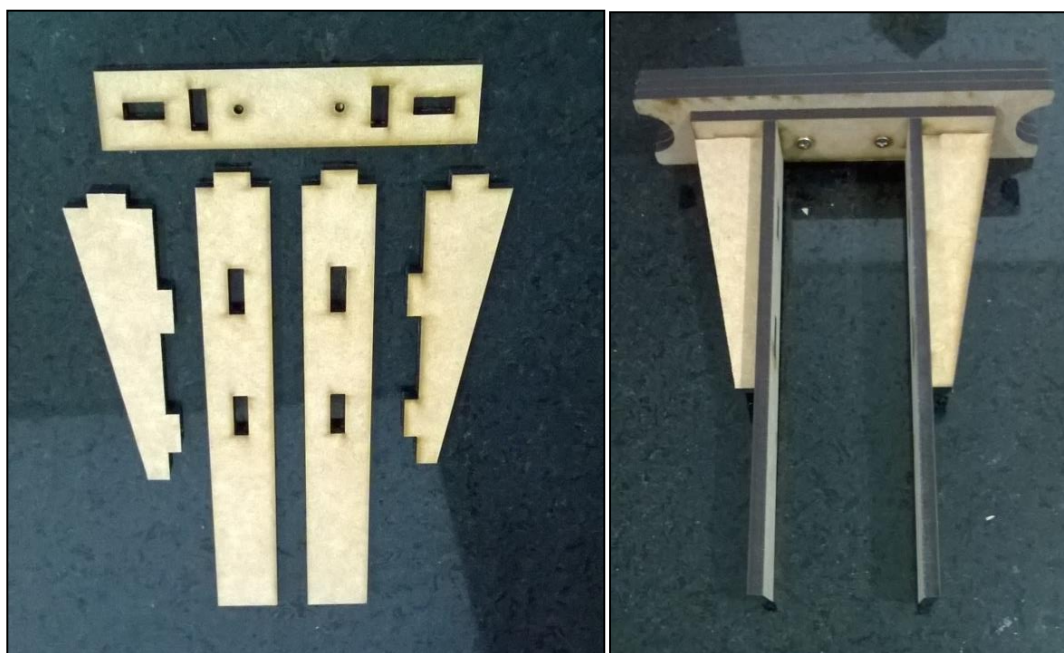
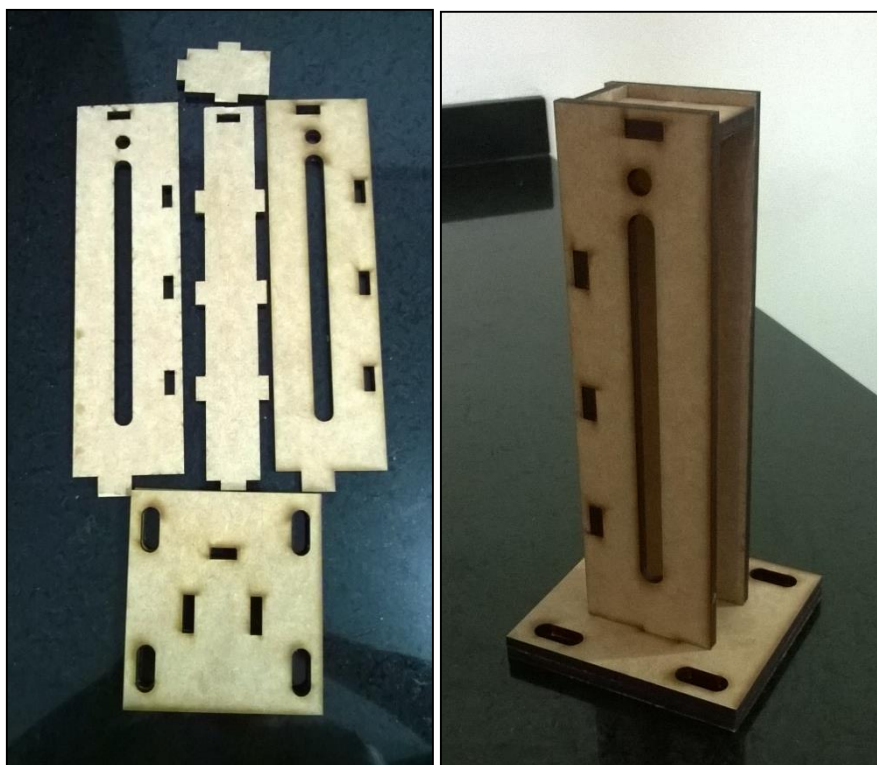


Figura 57 – Protótipo funcional do subsistema alinhamento 1 (AL\_D1)



Após a realização da montagem dos componentes do protótipo funcional DCB foi anexado o dispositivo à máquina de impacto por queda de peso, onde o subsistema aplicação de carga 2 (AP\_D2) foi fixado ao peso de queda da máquina através de um parafuso e o subsistema alinhamento 1 (AL\_D1) foi fixado a placa base 1 (PB\_E1) de madeira presa a base da máquina de impacto, conforme mostrado na Figura 58. Também foi confeccionado corpo de prova em MDF, composto por duas placas coladas, com dimensões úteis de 250 x 20 x 5,5 mm e pré-trinca de 110 mm, e foi anexado ao dispositivo DCB. Então, foi simulado um ensaio DCB dinâmico, liberando o impactador a uma altura de 0,30m, para realizar uma avaliação estrutural do dispositivo, como mostra a Figura 59.



Figura 58 – Montagem do protótipo funcional do dispositivo DCB dinâmico

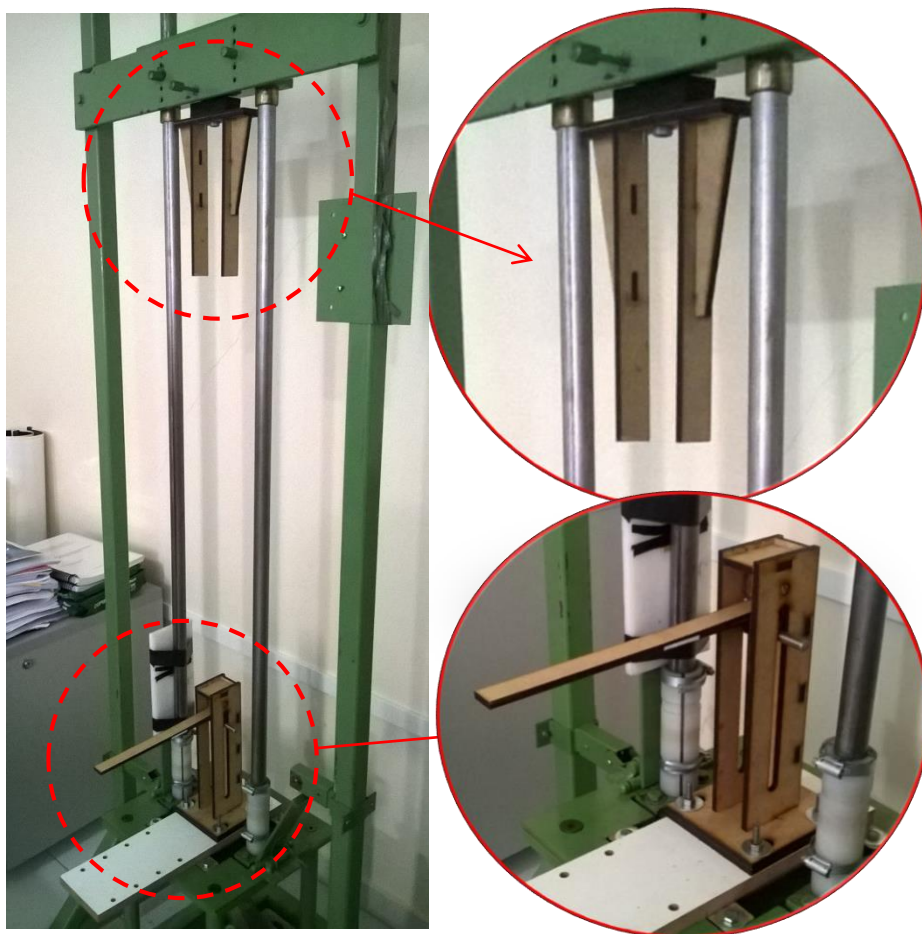
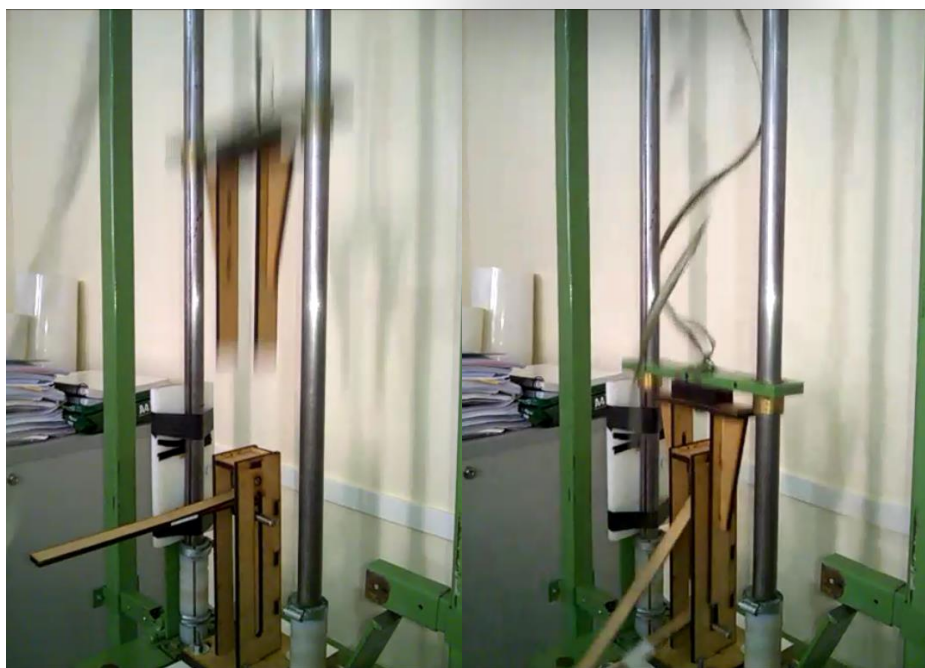


Figura 59 – Protótipo funcional do dispositivo DCB durante a simulação de ensaio



O dispositivo não apresentou nenhuma necessidade de mudança no projeto original, pois possuiu boa adequação com a máquina de impacto, apresentando

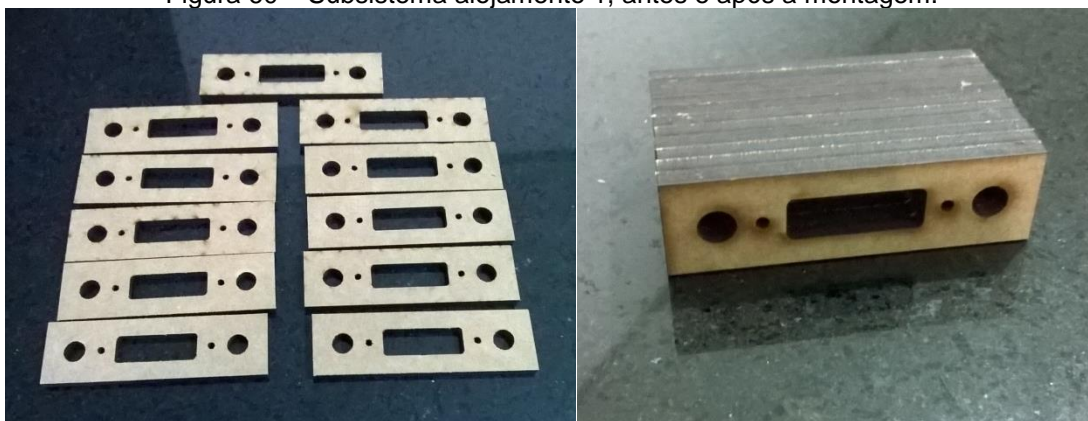


perfeito encaixe na interface dispositivo/máquina. Sendo assim, o conceito gerado está apto para a realização do projeto preliminar.

#### 4.3.2 Protótipo funcional do Dispositivo Modo-II ELS Dinâmico

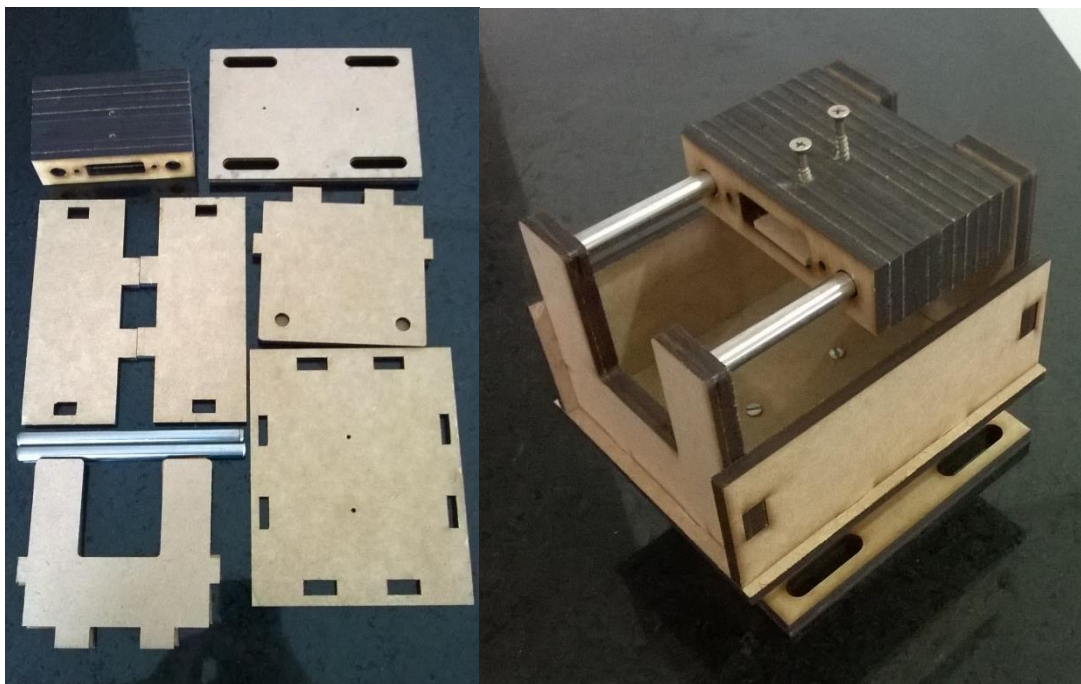
Para a confecção do protótipo funcional do dispositivo modo-II ELS dinâmico foi necessário acrescentar furações e encaixes para fixação das peças, do mesmo modo do dispositivo DCB. O protótipo funcional foi realizado com placas de 3 e 6 mm de espessura de MDF. Mostra-se na Figura 60 o item alojamento 1 (AL\_E1) antes de ser montado, onde foram colados 11 perfis de 6mm para formar as dimensões desejadas.

Figura 60 – Subsistema alojamento 1, antes e após a montagem.



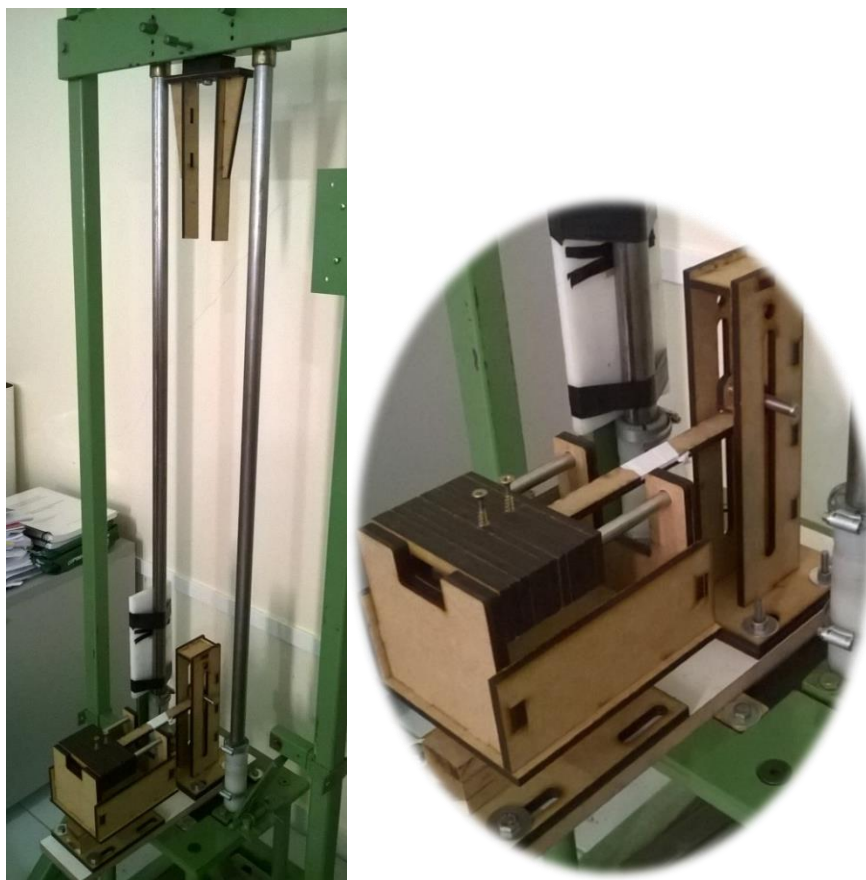
Mostra-se na Figura 61 o mecanismo que guia o movimento horizontal do ensaio, cortados e montados, respectivamente. O impactador e a torre vertical foram mostrados no protótipo funcional do dispositivo DCB dinâmico, pois são os mesmos que serão utilizados neste dispositivo.

Figura 61 – Protótipo funcional do dispositivo alinhamento horizontal (AH\_E2)



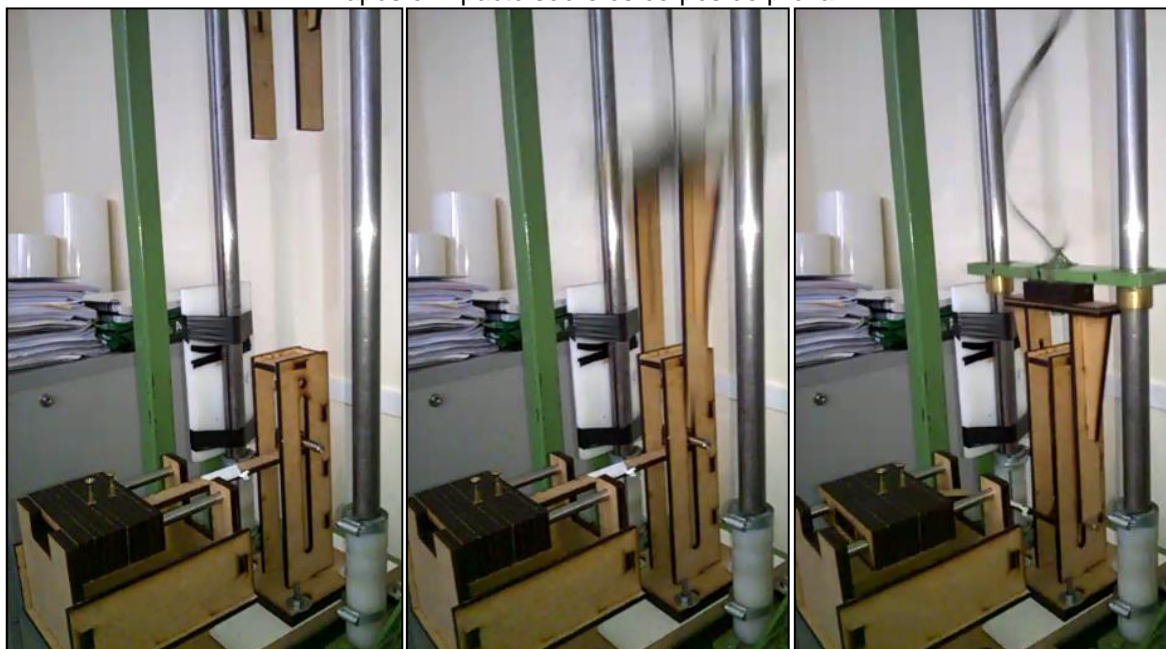
Após a montagem do mecanismo foi realizada a montagem na máquina de impacto, sendo necessária apenas a fixação deste mecanismo, pois o impactador, a torre DCB e a placa base já estavam fixados. Também foi confeccionado corpo de prova em MDF, composto por duas placas coladas, com dimensões úteis de 185 x 20 x 5,5 mm e pré-trinca de 110mm, e foi anexado ao dispositivo ELS. Então, foi simulado um ensaio ELS dinâmico, liberando o impactador a uma altura de 30cm. O ensaio serviu como uma forma de analisar o comportamento do dispositivo durante um caso real, analisando a necessidade de alguma possível modificação no projeto. A Figura 62 mostra a montagem do dispositivo na máquina de impacto,

Figura 62 – Dispositivo ELS dinâmico montado à estrutura da máquina de impacto



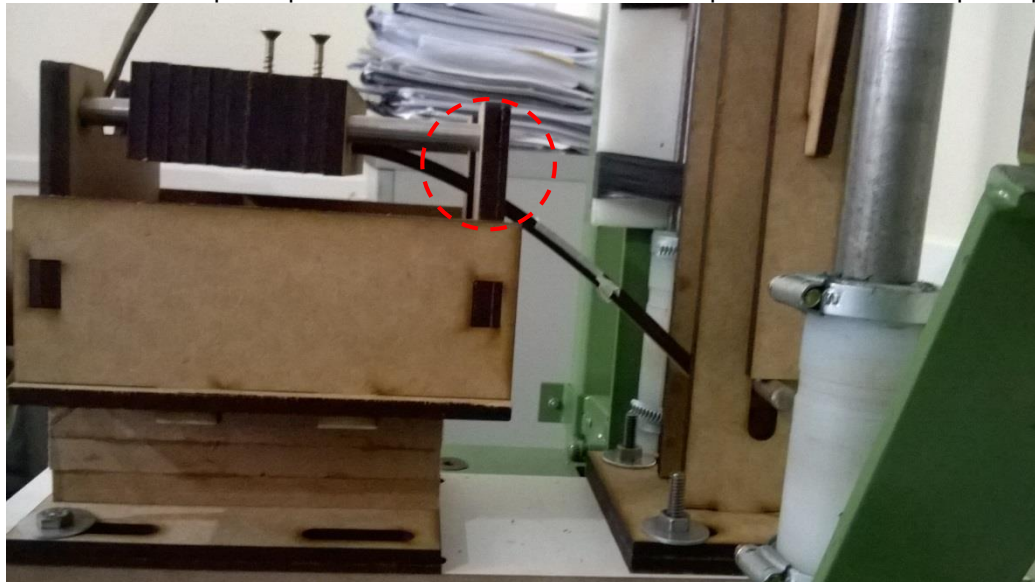
A Figura 63 mostra o comportamento do dispositivo ELS dinâmico durante a simulação de ensaio sobre o protótipo funcional, no momento anterior, durante e posterior ao impacto sobre o corpo de prova.

Figura 63 – Simulação de ensaio sobre o protótipo funcional ELS nos momentos anterior, durante e após o impacto sobre os corpos de prova



Ao avaliar o dispositivo após a simulação de ensaio ELS dinâmico foi observado que o acompanhamento do crescimento da trinca será interrompido, pois a estrutura ELS que sustenta os eixos guias horizontais se coloca a frente da visualização do corpo de prova, como mostrado na Figura 64.

Figura 64 – Detalhe do protótipo funcional ELS dinâmico interrompendo a visão do corpo de prova



A solução encontrada para este inconveniente foi aumentar a altura entre a fixação do corpo de prova e o topo da estrutura ELS. Para isso, foi realizada a mudança no projeto, sendo necessária nova escolha de soluções da matriz morfológica.

A matriz morfológica com os novos itens escolhidos para fabricação do dispositivo é apresentada no Quadro 3.

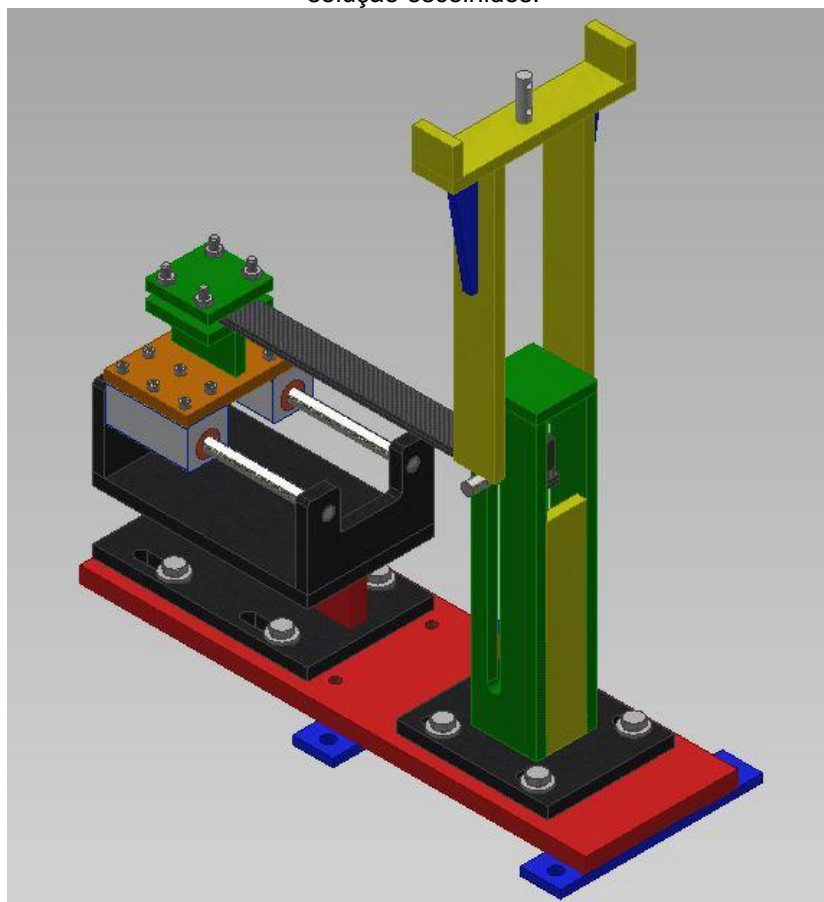
Quadro 3 – Matriz morfológica com a escolha dos novos itens para o dispositivo ELS dinâmico

| Tipo de ensaio       | Dispositivo          | Subsistema                               | Princípios de Solução |        |        |       |
|----------------------|----------------------|--|-----------------------|--------|--------|-------|
| Fratura Interlaminar | Modo-II ELS Dinâmico | Subsistema Transmissão de Carga          | TC_E1                 | TC_E2  |        |       |
|                      |                      | Alinhamento horizontal                   | AH_E1                 | AH_E2  | AH_E3  | AH_E4 |
|                      |                      | Eixo guia horizontal                     | EG_E1                 | EG_E2  | EG_E3  |       |
|                      |                      | Alinhamento vertical                     | AV_E1                 |        |        |       |
|                      |                      | Subsistema de alojamento                 | AL_E1                 | AL_E2  | AL_E3  |       |
|                      |                      | Subsistema fixação do corpo de prova ELS | FCP_E1                | FCP_E2 | FCP_E3 |       |
|                      |                      | Subsistema suporte de ligação            | SL_E1                 | SL_E2  | SL_E3  | SL_E4 |
|                      |                      | Subsistema estrutural ELS                | EST_E1                |        |        |       |
|                      |                      | Subsistema aplicação de carga ELS        | AC_E1                 | AC_E2  |        |       |
|                      |                      | Subsistema placa base                    | PB_E1                 |        |        |       |

A configuração definitiva, após as mudanças realizadas no projeto do dispositivo ELS dinâmico, é mostrada na Figura 65.



Figura 65 - Vista em perspectiva do novo dispositivo ELS dinâmico, com os novos princípios de solução escolhidos.



#### 4.4 Projeto Preliminar

##### 4.4.1 Projeto Preliminar do Dispositivo Modo-I DCB Dinâmico

Os testes para dimensionamento de cada componente utilizado no dispositivo modo-I DCB dinâmico foram realizados utilizando o software de simulação computacional Autodesk® Inventor® versão estudante.

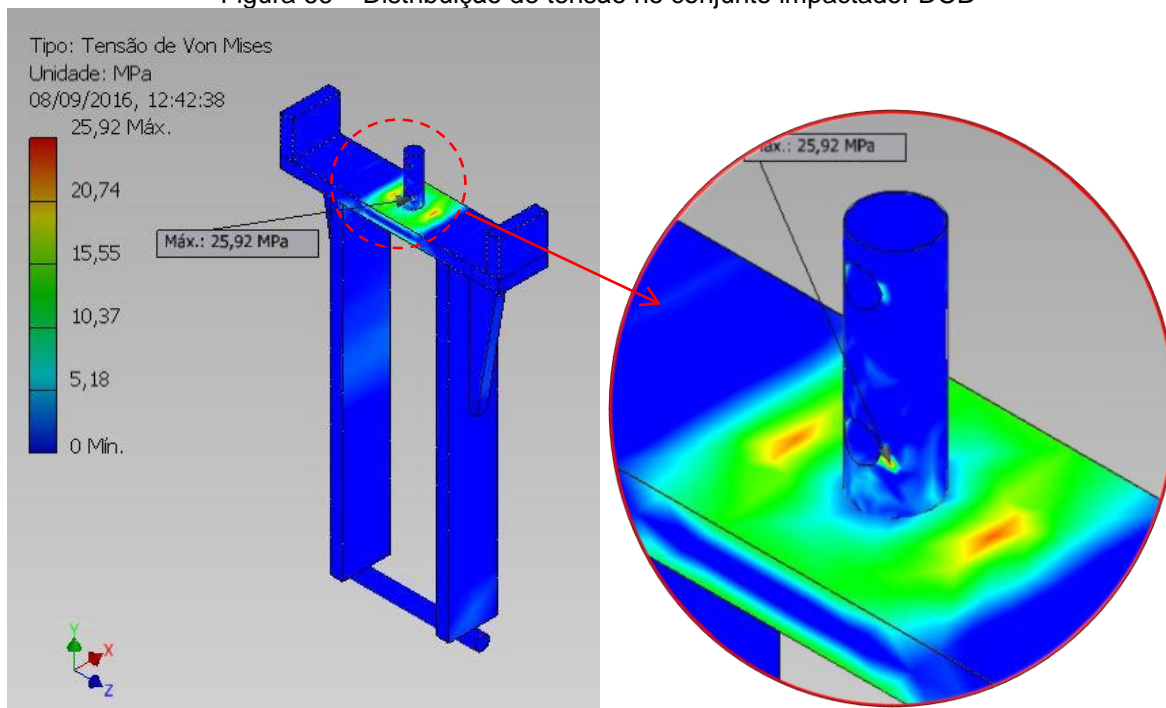
A análise computacional foi realizada dividindo o dispositivo DCB dinâmico em dois conjuntos. O primeiro é o conjunto impactador, composto pelo subsistema aplicação de carga 2 (AC\_D2), e o segundo é o conjunto torre DCB, composto pelos itens da matriz morfológica TC\_D1, AL\_D1, FCP\_D2 e BF\_D1.

Em cada conjunto foi aplicado separadamente uma força de 1.000 N, simulando a maior força aplicada ao corpo de prova DCB registrada em trabalhos acadêmicos. Foi simulada a força de contato entre o conjunto impactador e o pino de carga.

O conjunto impactador foi o primeiro a ser dimensionado, para isso, foi considerado um pino fixo e o impactador aplicando uma força de 1.000 N sobre ele. Na Figura 66 é possível observar a maior tensão sobre o pino de fixação do

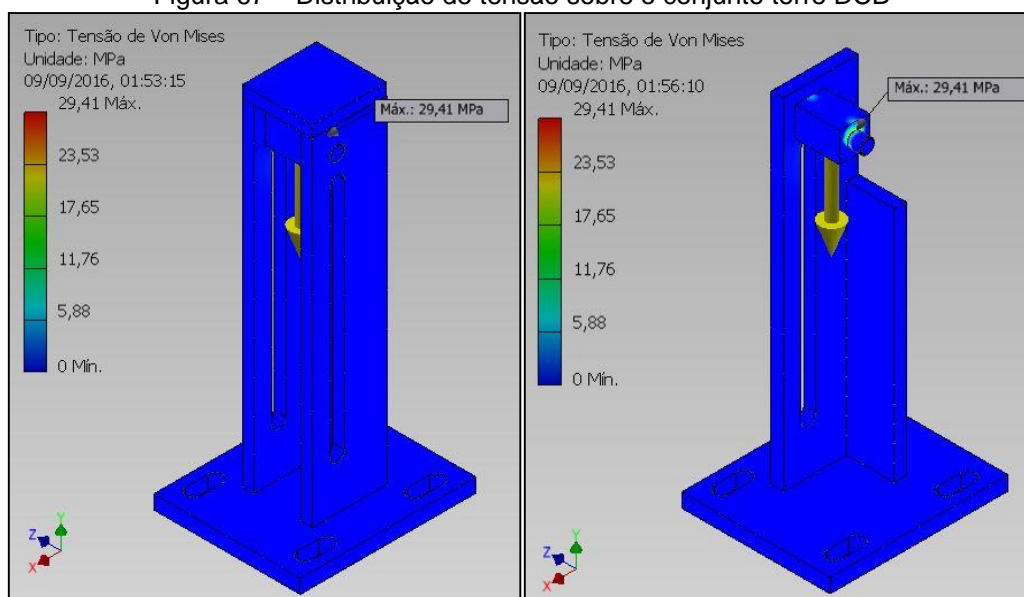
impactador com a máquina, com o valor de 25,92 MPa, sendo abaixo do limite de escoamento do aço 1020, que é de 210 MPa.

Figura 66 – Distribuição de tensão no conjunto impactador DCB



O conjunto torre DCB foi simulado fazendo a consideração de que o pino superior, que é responsável pela fixação do corpo de prova na parte superior, estava fixado, e uma força de 1.000 N era aplicada sobre o bloco de carga, com sentido descendente. O maior valor de tensão sobre a torre DCB foi de 29,41 MPa sobre o bloco de carga, como mostra a Figura 67.

Figura 67 – Distribuição de tensão sobre o conjunto torre DCB



Com a utilização do software foi possível avaliar a distribuição de tensão de cada um dos componentes isoladamente.

Nas figuras 68 a 70 são mostradas as análises de tensão de cada componente que forma a torre DCB, possuindo tensão máxima de 98,71 MPa sobre o pino de carga inferior.

Figura 68 – Distribuição de tensão sobre o bloco de carga e o pino superior que compõem o subsistema FCP\_D2, e tensão máxima de 29,41 e 25,03 MPa, respectivamente.

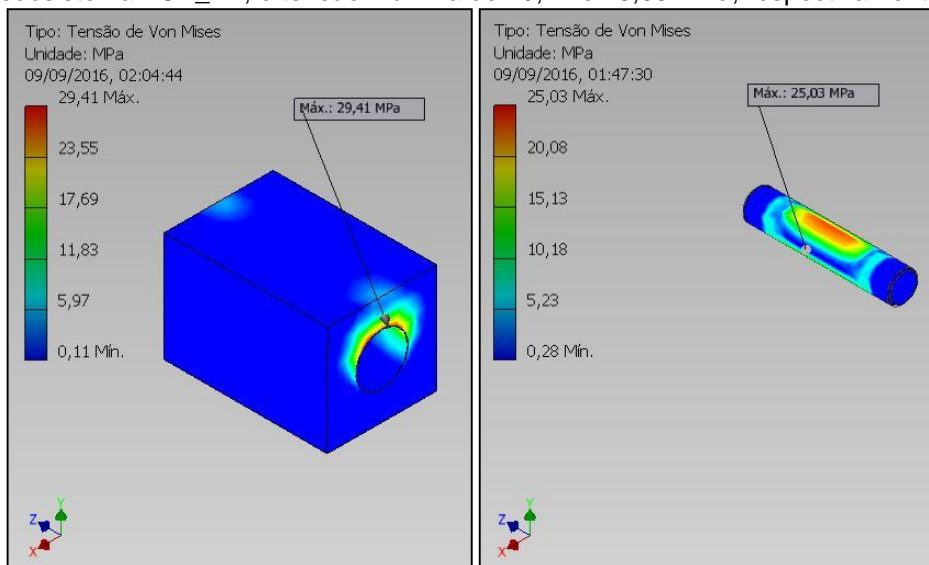


Figura 69 - Distribuição de tensão sobre o bloco de carga e o pino de carga superior que compõem o subsistema TC\_D1, e tensão máxima de 44,09 e 98,71 MPa, respectivamente.

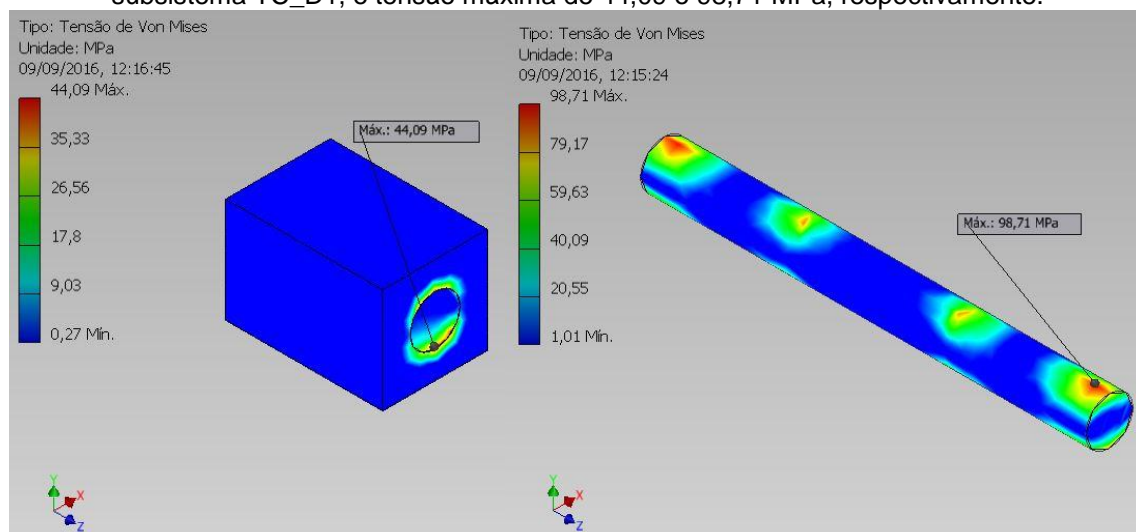
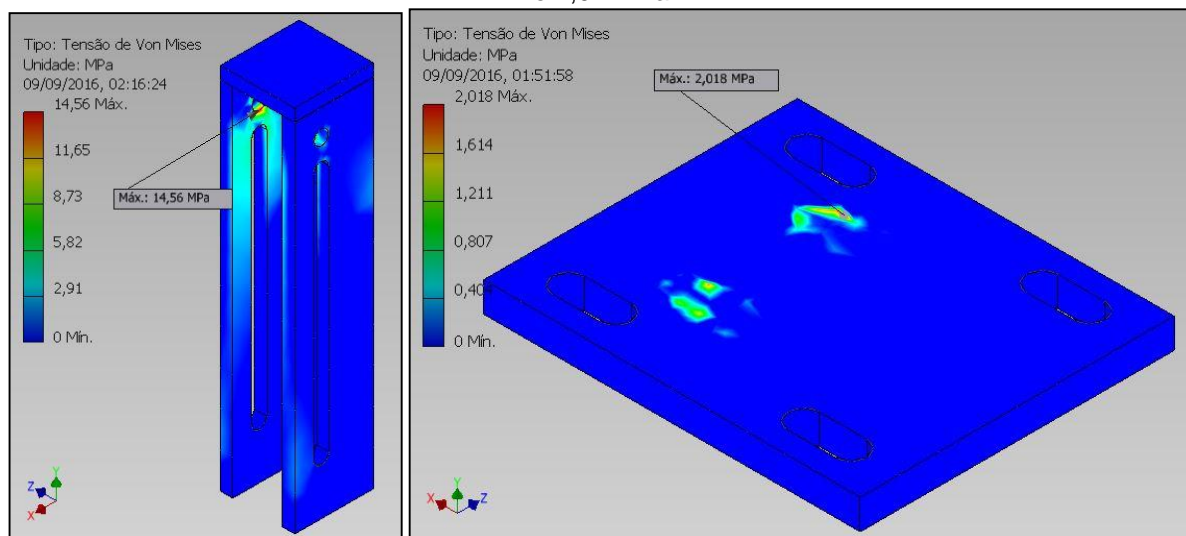




Figura 70 – Distribuição de tensão sobre os subsistemas AL\_D1 e BF\_D1, e tensão máxima de 14,56 e 2,02 MPa.



Através das simulações foi analisado o valor da tensão encontrada para cada elemento e comparado com o valor encontrado em tabela de propriedades mecânicas fornecida por fabricantes, conforme mostrado no Quadro 4. O tipo de material escolhido foi feito com base no limite de escoamento.

Quadro 4 - Material selecionado após a simulação para o dispositivo modo-I DCB dinâmico

| Elemento     | Valor Máximo simulado (MPa) | Tipo de material escolhido | Limite Escoamento (MPa) | Fator de Segurança Escoamento |
|--------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Impactador   | 25,9                        | Aço ABNT 1020              | 210                     | 8,1                           |
| Bloco FCP_D2 | 29,4                        | Alumínio                   | 110                     | 3,7                           |
| Pino FCP_D2  | 25,0                        | Aço inox 304               | 205                     | 8,2                           |
| Bloco TC_D1  | 44,1                        | Alumínio                   | 110                     | 2,5                           |
| Pino TC_D1   | 98,7                        | Aço inox 304               | 205                     | 2,1                           |
| AL_D1        | 14,6                        | Aço ABNT 1020              | 210                     | 14,4                          |
| BF_D1        | 2,0                         | Aço ABNT 1020              | 210                     | 104,1                         |

#### 4.4.2 Projeto Preliminar do Dispositivo Modo-II ELS Dinâmico

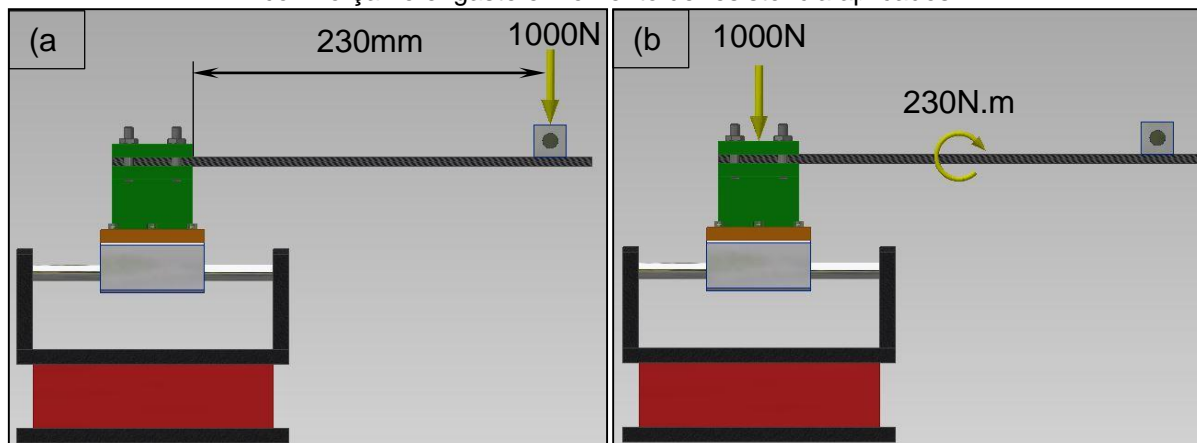
O projeto preliminar do dispositivo modo-II ELS dinâmico seguiu os mesmos passos do que foi feito anteriormente no dispositivo DCB.

Foi realizada a simulação sobre o dispositivo utilizando os princípios de resistência dos materiais, onde o ensaio consistia em uma viga em balanço,

engastada na extremidade esquerda e com uma força de 1.000 N aplicada sobre a outra extremidade de um corpo de prova de 230 mm, como mostrado na Figura 71a.

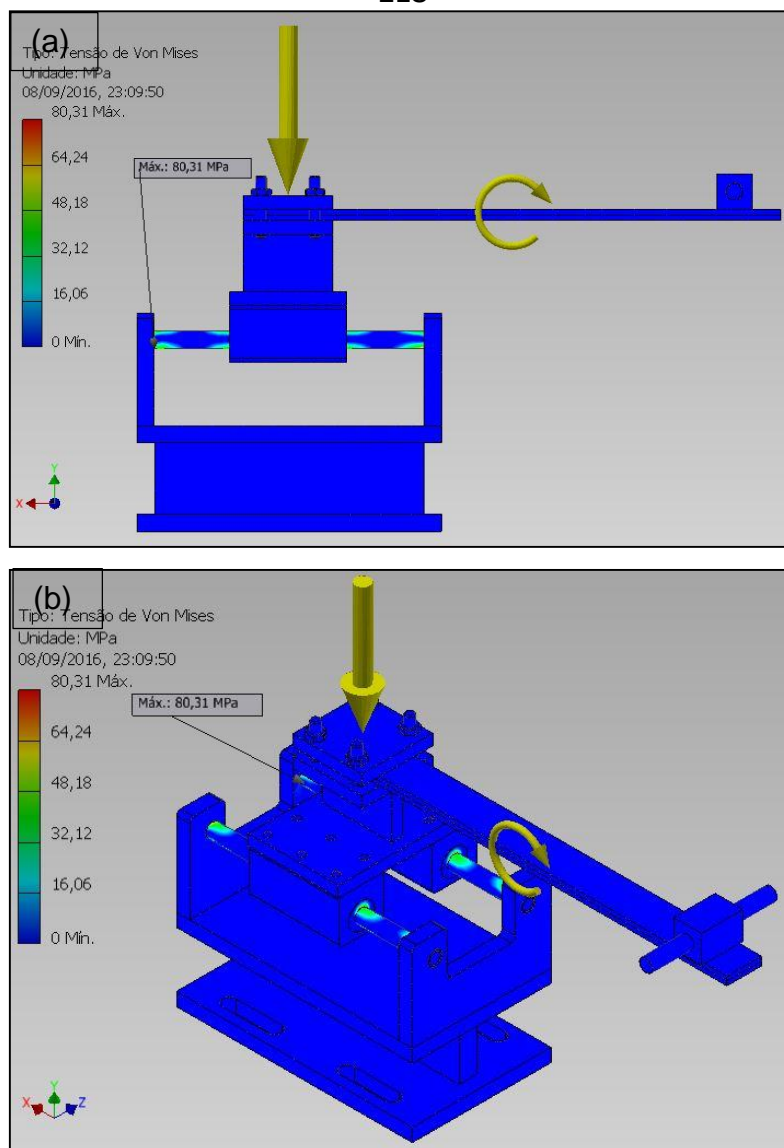
Foram realizados os cálculos e demonstrado que o ensaio pode ser reproduzido utilizando o momento e força de reação no engaste, onde foi obtido valores de 230 N.m e 1.000 N, respectivamente, como mostrado na Figura 71b.

Figura 71 – Esquema do ensaio ELS com (a) uma força aplicada na extremidade, e (b) o equivalente com força no engaste e momento de resistência aplicados.



A análise de tensão foi realizada apenas sobre o mecanismo de movimentação horizontal ELS, pois o ensaio sobre o impactador e a torre DCB foram feitos anteriormente no projeto preliminar do dispositivo DCB. As Figura 72a e Figura 72b mostram a vista lateral e em perspectiva da análise de tensão feita sobre o mecanismo horizontal ELS, mostrando uma tensão máxima de 80,31 MPa.

Figura 72 – (a) Vista lateral e em (b) perspectiva da análise de tensão sobre o mecanismo horizontal ELS



Com a utilização do software foi possível avaliar a distribuição de tensão de cada um dos componentes isoladamente.

Mostra-se na Figura 73 a distribuição de tensão sobre o subsistema transmissão de carga 1 (TC\_E1), que é composto pelo pino e o bloco carga, onde apresentam tensões máximas de 67,53 MPa e 43,92 MPa, respectivamente.

As distribuições de tensões e as máximas tensões dos subsistemas AH\_E2, EG\_E2, AL\_E3, FCP\_E3, SL\_E2, EST\_E1 e PB\_E1, são mostradas nas Figuras 74 a 80, respectivamente.

Figura 73 - Distribuição de tensão sobre o subsistema transmissão de carga 1 (TC\_E1)

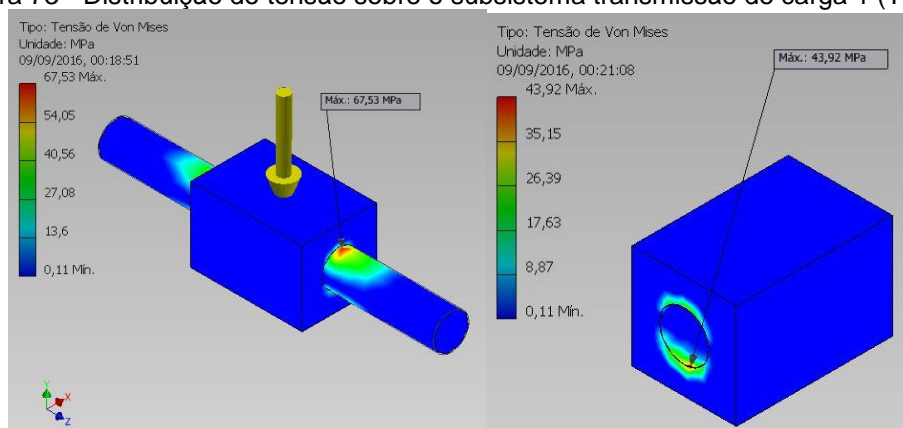


Figura 74 – Distribuição de tensão sobre o subsistema alinhamento horizontal 2 (AH\_E2), e tensão máxima de 64,91 MPa.

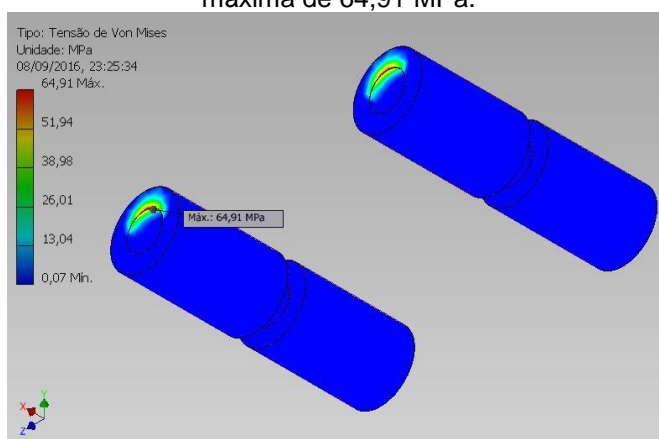


Figura 75 - Distribuição de tensão sobre o subsistema eixo guia 2 (EG\_E2), e tensão máxima de 80,31 MPa.

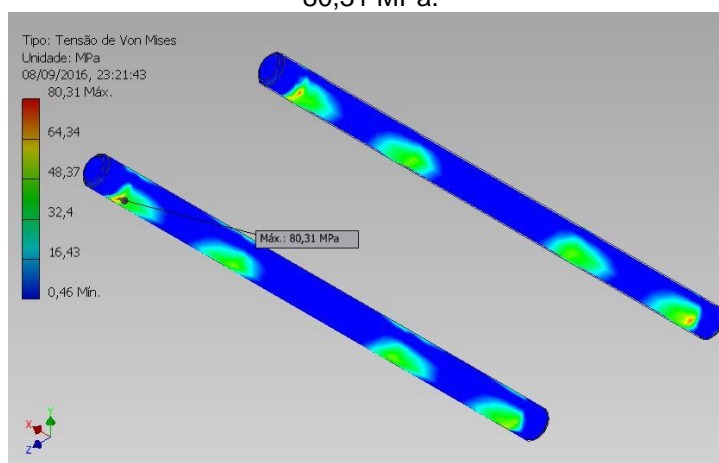


Figura 76 - Distribuição de tensão sobre o subsistema alojamento 3 (AL\_E3), e tensão máxima de 10,05 MPa.

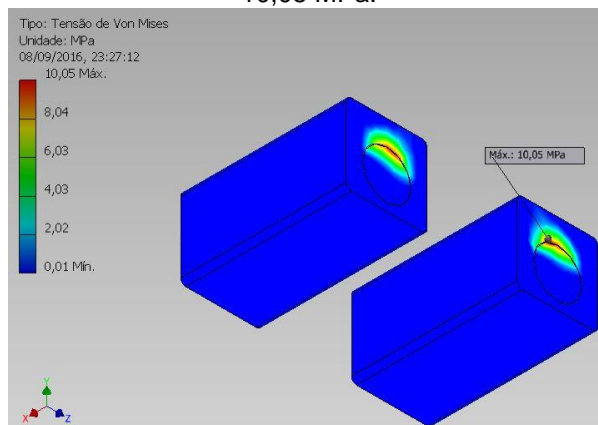


Figura 77 - Distribui  o de tensão sobre o subsistema fixa  o do corpo de prova ELS 3 (FCP\_E3), e tensão máxima de 9,16 MPa.

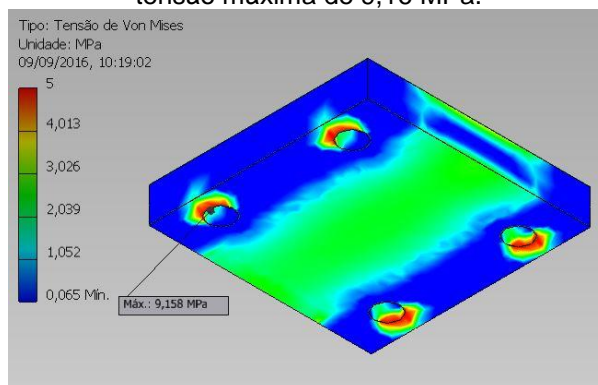


Figura 78 - Distribui  o de tensão sobre o subsistema suporte de liga  o 2 (SL\_E2), e tensão máxima de 18,07 MPa.

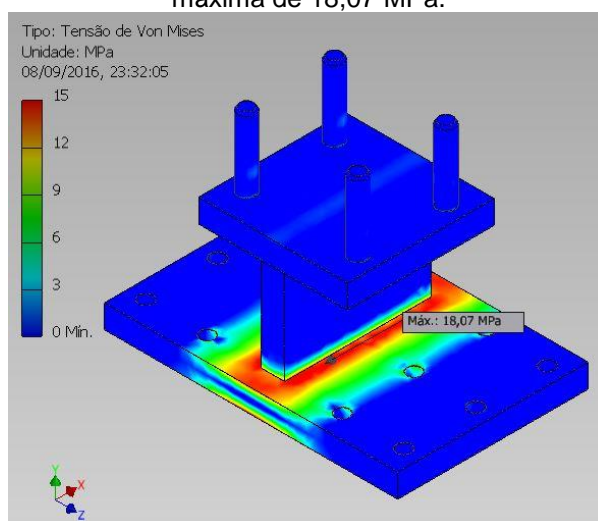


Figura 79 - Distribuição de tensão sobre o subsistema estrutural ELS 1 (EST\_E1), e tensão máxima de 30,58 MPa.

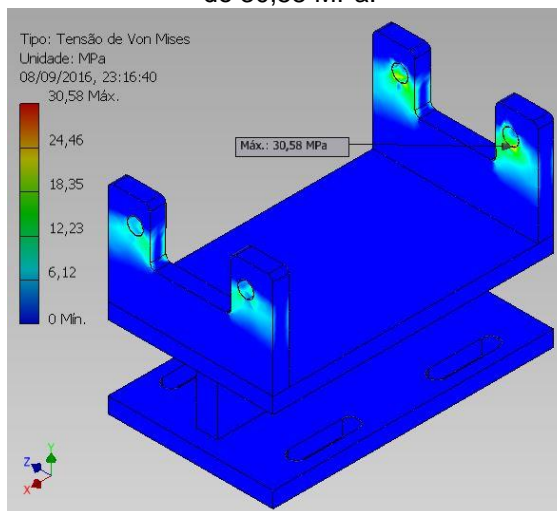
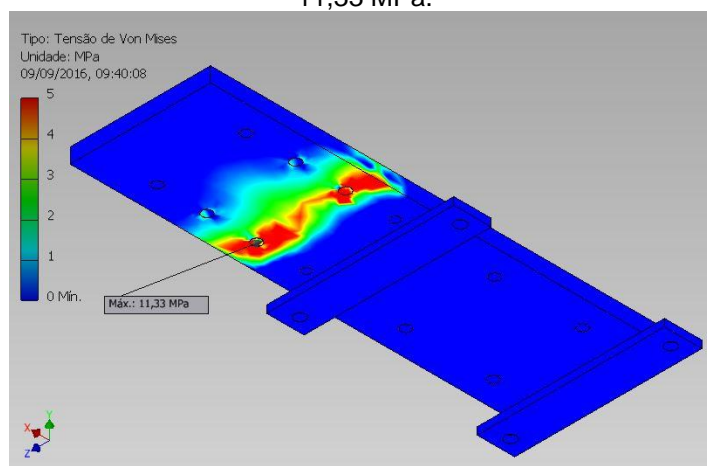


Figura 80 - Distribuição de tensão sobre o subsistema placa base 1 (PB\_E1), e tensão máxima de 11,33 MPa.



A escolha do item alinhamento horizontal 2 (AH\_E2) foi feita com base na carga aplicada e feita uma pesquisa no catalogo do fabricante, que indica no mínimo 02 rolamentos lineares por eixo, logo, necessita-se de um total de 4 rolamentos lineares.

O rolamento linear escolhido foi o modelo LM10uu, que é mostrado no anexo A, que possui diâmetro interno de 10 mm, diâmetro externo de 19 mm, e cada rolamento pode sustentar cargas dinâmicas de 380 N e estáticas de 550 N. Logo, a sustentação dos 04 rolamentos seria de 1.520 N de carga dinâmica, e 2.200 N de carga estática.

Através das simulações foi analisado o valor da tensão encontrada para cada elemento e comparado com o valor encontrado em tabela de propriedades mecânicas

fornecida por fabricantes. O tipo de material escolhido foi feito com base no limite de escoamento, como mostrado no Quadro 5.

Quadro 5 - Material selecionado após a simulação para o dispositivo modo-II ELS dinâmico

| Elemento    | Valor Máximo simulado (Mpa) | Tipo de material escolhido | Limite Escoamento (MPa) | Fator de Segurança Escoamento |
|-------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Bloco TC_E1 | 43,9                        | Alumínio                   | 110                     | 2,5                           |
| Pino TC_E1  | 67,5                        | Aço inox 304               | 205                     | 3,0                           |
| EG_E2       | 80,3                        | Aço ABNT 1045              | 310                     | 3,9                           |
| AL_E3       | 10,1                        | Alumínio                   | 110                     | 10,9                          |
| FCP_E3      | 9,2                         | Aço ABNT 1020              | 210                     | 22,9                          |
| SL_E2       | 18,1                        | Aço ABNT 1020              | 210                     | 11,6                          |
| EST_E1      | 30,6                        | Aço ABNT 1020              | 210                     | 6,9                           |
| PB_E1       | 11,3                        | Aço ABNT 1020              | 210                     | 18,5                          |

#### 4.5 Projeto Detalhado

O projeto detalhado para fabricação dos dispositivos para estudo de fratura interlaminar modo-I e modo-II de materiais dissimilares, que conta com desenhos, dimensões e especificações dos materiais utilizados pode ser consultado no ANEXO B.

#### 4.6 Fabricação

Após a etapa do projeto preliminar com o dimensionamento de todos os subsistemas e da etapa do projeto detalhado com os respectivos desenhos e instruções de fabricação dá-se início a fabricação do protótipo do dispositivo de ensaio.

A fabricação dos dispositivos dinâmicos DCB modo-I e ELS modo-II foram realizados em uma empresa de construção mecânica situada no Distrito dos Mecânicos na cidade de Campina Grande – PB.

Foi repassado para empresa o projeto detalhado dos dispositivos desenvolvidos com todos os desenhos e indicações de fabricação dos subsistemas, onde deve seguir todas as recomendações do projeto.



Inicialmente foram cortadas as chapas de aço em forma de retângulo nas dimensões solicitadas, e enumeradas para ambos os dispositivos DCB e ELS, de acordo com o projeto detalhado, para facilitar o rastreamento nas etapas posteriores, conforme Figura 81.

Figura 81 – Chapas cortadas nas dimensões solicitadas e enumeradas



#### 4.6.1 Fabricação do Dispositivo Modo-I DCB Dinâmico

Utilizando uma furadeira industrial e uma fresadora, foram usinados furos e rasgos nas chapas cortadas que constituem o dispositivo DCB (Figura 82).

Figura 82 – Conjunto torre DCB após usinagem dos rasgos e furos



Em seguida, cada componente usinado foi posicionado no seu devido lugar (Figura 83), para subsequente soldagem.



Figura 83 – Conjunto torre DCB e impactador após posicionamento



A soldagem foi realizada sobre os componentes dos conjuntos torre DCB e impactador, onde para o impactador foi realizada uma restrição sobre os garfos de ataque, para que durante o processo de soldagem evitasse a variação das dimensões do projeto, conforme Figura 84.

Figura 84 – Soldagem dos conjuntos torre DCB e impactador



Após a soldagem, foi realizado o acabamento superficial e a pintura dos conjuntos. O protótipo do dispositivo DCB é mostrado na Figura 85, apresentando-se nos conjuntos torre DCB e impactador.

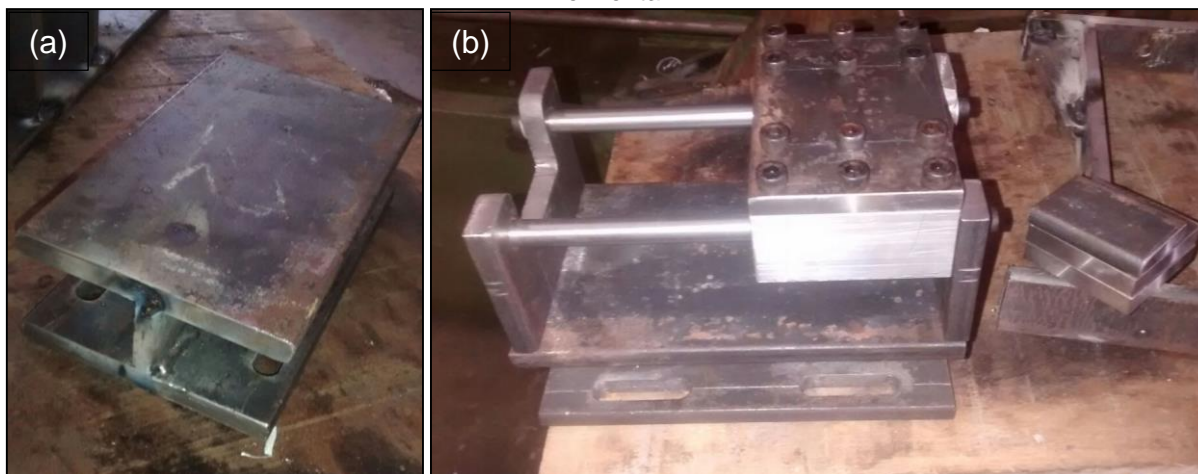
Figura 85 – Dispositivo DCB com conjuntos torre DCB e impactador após pinturas.



#### 4.6.2 Fabricação do Dispositivo Modo-II ELS Dinâmico

Após a realização do corte das chapas, das furações e rasgos, foi iniciado processo de montagem do mecanismo de movimentação horizontal ELS. Inicialmente, foram soldados os componentes que constituem o subsistema estrutural ELS, como mostrado na Figura 86a. Foi feita a inserção do rolamento linear ao subsistema de alojamento e a sua fixação ao subsistema suporte de ligação, feita por parafusos, como mostrado na Figura 86b.

Figura 86 – Montagem (a) do subsistema estrutural ELS e (b) do mecanismo de movimentação horizontal



Subsequentemente foram soldados os componentes do suporte de ligação e anexada a placa de fixação do corpo de prova, a qual é feita por parafusos. A Figura 87 mostra a montagem do dispositivo ELS, composto pelos conjuntos mecanismo de movimentação horizontal ELS, placa base e torre DCB. Na Figura 88 são mostrados os conjuntos que compõem o dispositivo ELS após realização acabamento e pintura.

Figura 87 – Montagem do dispositivo modo-II ELS



Figura 88 – Dispositivo Modo-II ELS após a pintura





## 4.7 Testes

### 4.7.1 Teste do Dispositivo Modo-I DCB Dinâmico

Para a realização dos testes de validação do dispositivo de ensaio de fratura interlaminar dinâmica modo-I DCB, foi realizada a montagem do conjunto impactador e da torre DCB na máquina de impacto por queda de peso, como mostrado na Figura 89. A Figura 90 mostra os conjuntos impactador e torre DCB montados separadamente.

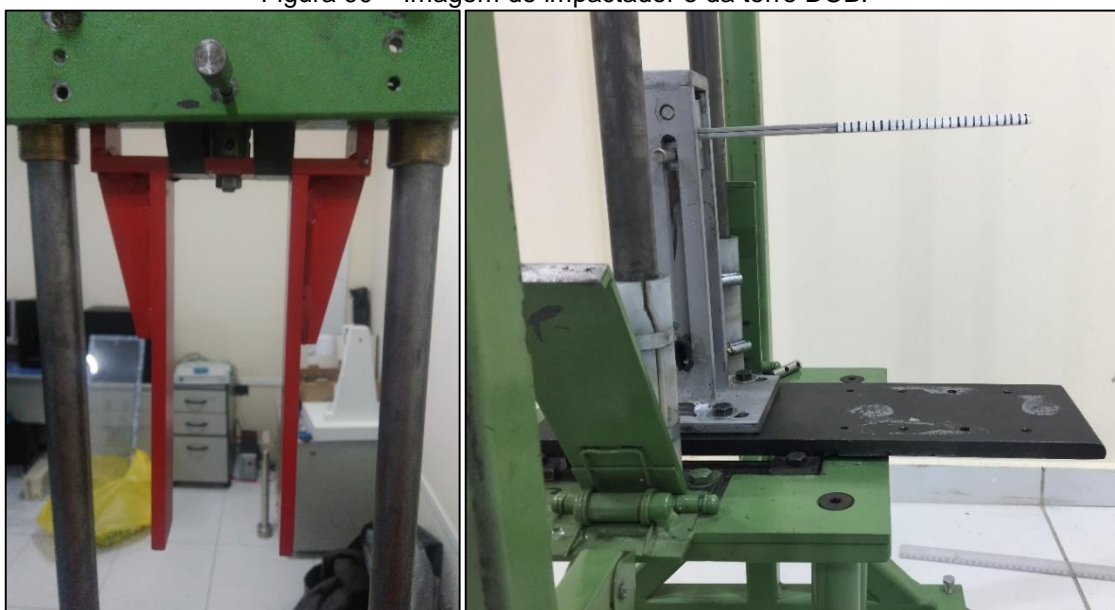
Foram confeccionados três corpos de prova em juntas adesivas de alumínio/epóxi, adotando as mesmas condições de teste.

O impactador, que anexado ao peso de impacto da máquina possuía 2,50 kg, foi posicionado a uma altura inicial de 0,3 m acima do corpo de prova, de modo que ao ser liberado alcançaria a velocidade de 2,42 m/s no momento do impacto com o corpo de prova. Os ensaios foram filmados e feita a análise quadro a quadro do momento do impacto.

Figura 89 – Montagem da máquina de impacto com o dispositivo DCB.



Figura 90 – Imagem do impactador e da torre DCB.



As figuras 91,92 e 93, mostram as imagens quadro a quadro dos ensaios com os corpos de prova CP\_DCB01, CP\_DCB02 e CP\_DCB03, respectivamente, captando os momentos em que o impactador se choca com o pino de carga, a trinca se propaga e os substratos dos corpos de prova se descolam totalmente.

Figura 91 – Quadro a quadro ensaio DCB com o corpo de prova CP\_DCB01.

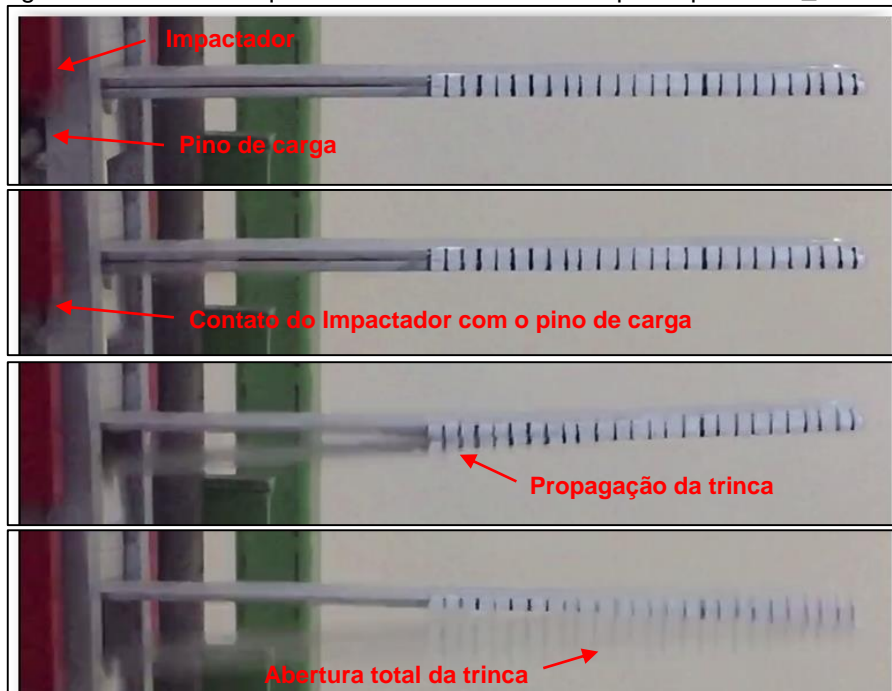


Figura 92 – Quadro a quadro ensaio DCB com o corpo de prova CP\_DCB02.

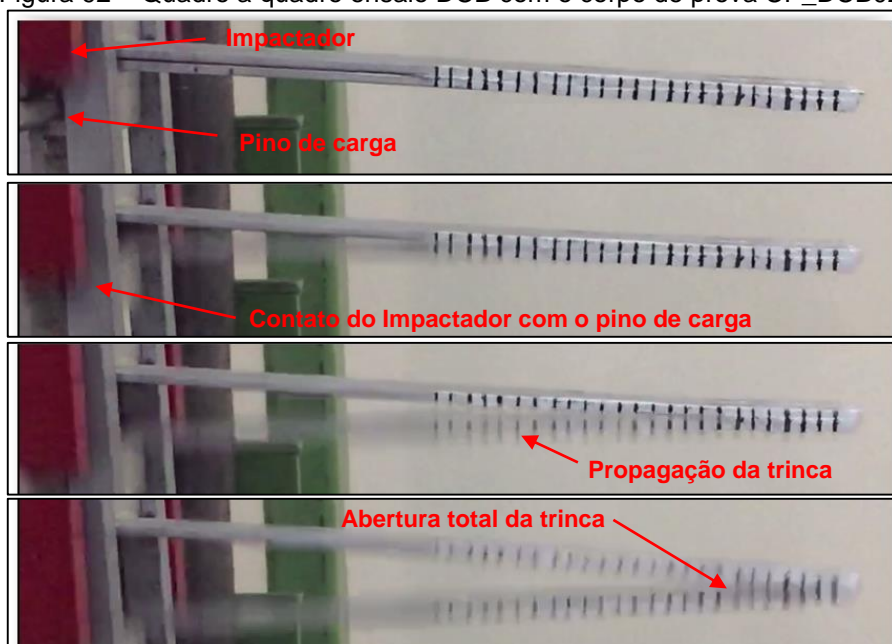
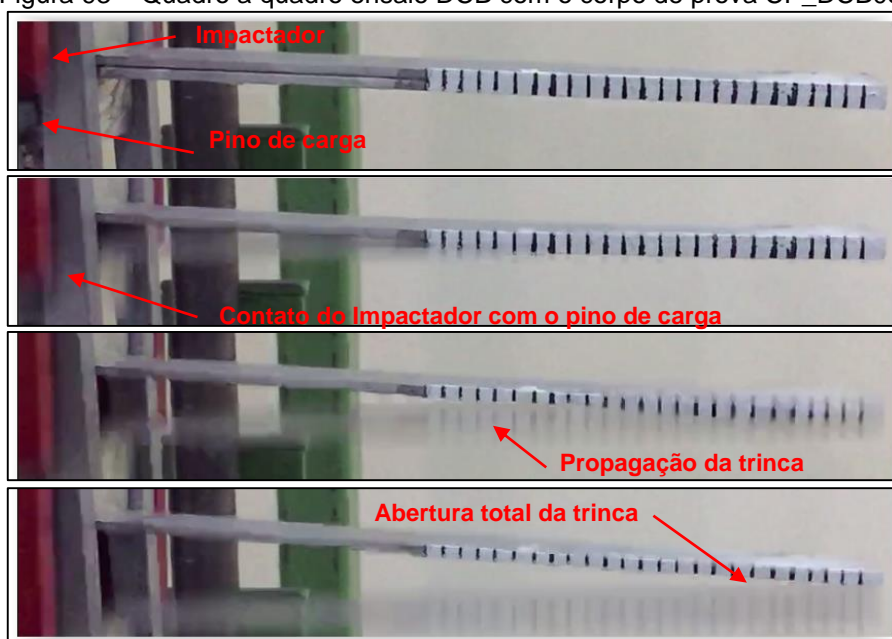


Figura 93 – Quadro a quadro ensaio DCB com o corpo de prova CP\_DCB03.

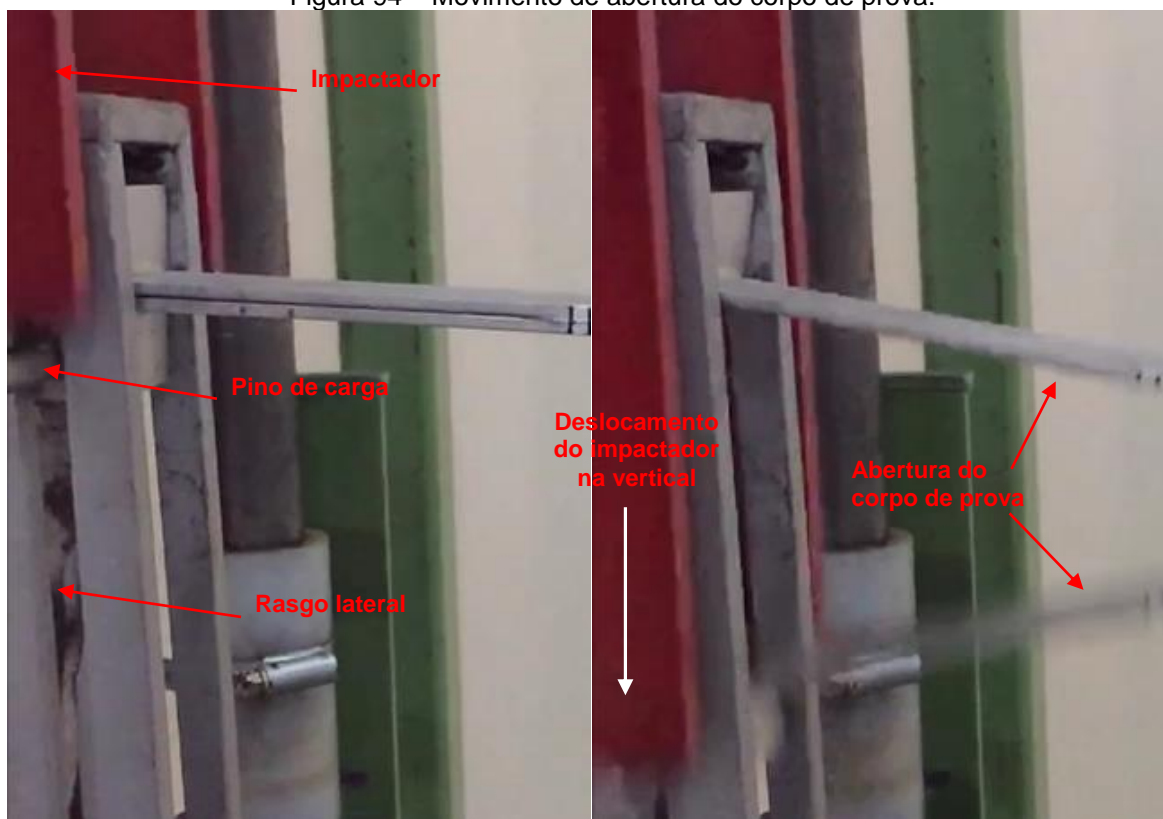


Não foi possível acompanhar o crescimento da trinca de modo nítido, devido à câmera alcançar uma baixa quantidade de quadros por segundo para o acompanhamento ideal deste ensaio. Logo, foi analisado o comportamento do dispositivo e do corpo de prova durante o ensaio.

O dispositivo modo-I DCB dinâmico desenvolvido apresentou o comportamento esperado para a aplicação em ensaios de fratura interlaminar modo-I, isto é, após a

fixação do corpo de prova ao dispositivo, houve a aplicação da carga de impacto sobre o pino de carga do corpo de prova, provocando a fratura interlaminar pelo movimento de abertura do corpo de prova. A abertura do corpo de prova foi possível devido a presença de rasgos laterais da torre DCB, que guiam o movimento de abertura restritamente ao eixo vertical, como mostrado na figura 94.

Figura 94 – Movimento de abertura do corpo de prova.



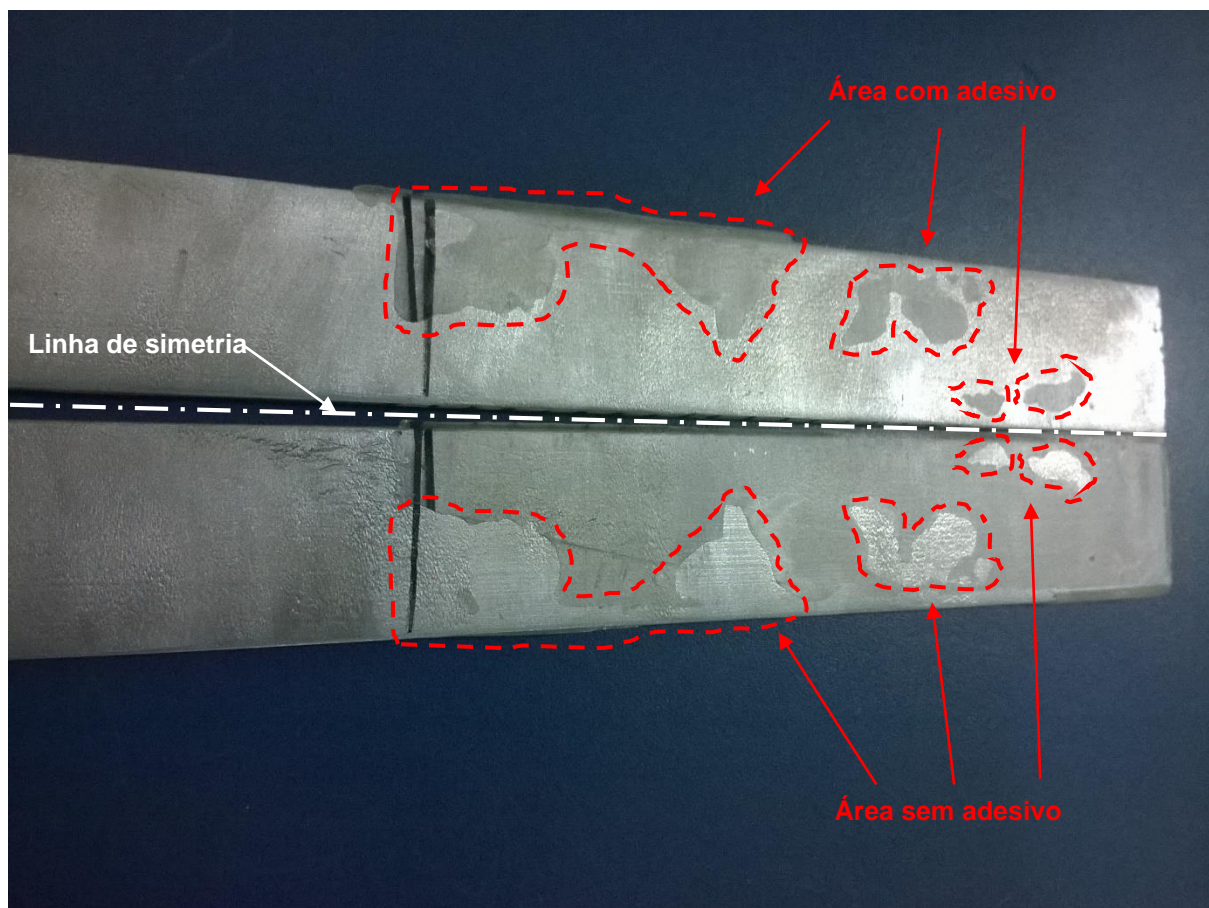
A análise do corpo de prova mostra que houve um descolamento entre o adesivo e o substrato. Isto pode ser atestado pela simetria entre as regiões com adesivo e as regiões sem adesivo presentes entre os substratos do corpo de prova após o ensaio, como mostra a área em destaque na Figura 95. O surgimento dessas áreas simétricas de regiões com adesivo e sem adesivo pode ser causada pela baixa adesão entre o adesivo e o substrato, onde durante o movimento de abertura do corpo de prova há a aplicação de esforços de tração na direção normal a interface adesivo/substrato, provocando o desprendimento de regiões inteiras de adesivo.

Pode-se concluir que o dispositivo de fratura interlaminar modo-I DCB dinâmico pode ser validado para uso em ensaios de fratura interlaminar modo-I, pois o dispositivo apresenta um comportamento típico de um ensaio modo-I DCB, e a análise



do corpo de prova mostra a presença de esforços de tração causados pelo movimento de abertura do corpo de prova, evidenciando uma fratura interlaminar modo-I.

Figura 95- Área fraturada do corpo de prova CP\_DCB01.

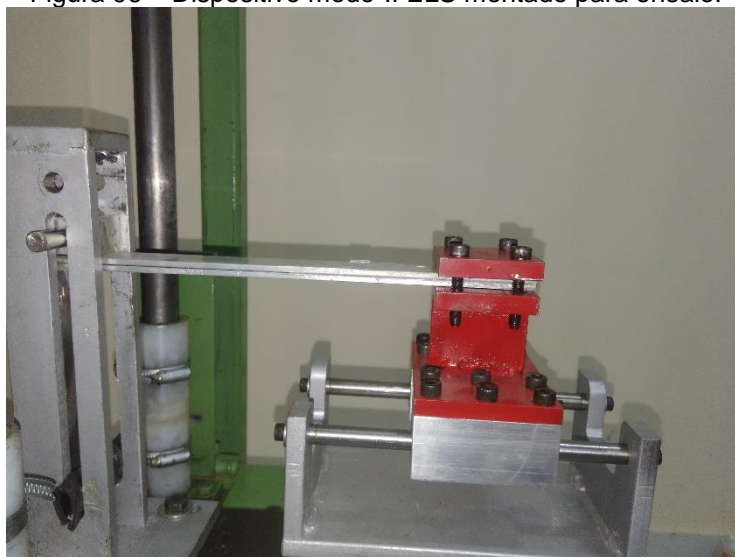


#### 4.7.2 Teste do Dispositivo Modo-II ELS Dinâmico

Para a realização dos testes de validação do dispositivo de ensaio de fratura interlaminar dinâmica modo-II ELS, foi mantida a montagem do conjunto impactador e da torre DCB na máquina de impacto por queda de peso, e foi montado o mecanismo horizontal ELS como mostrado na Figura 96.



Figura 96 – Dispositivo modo-II ELS montado para ensaio.



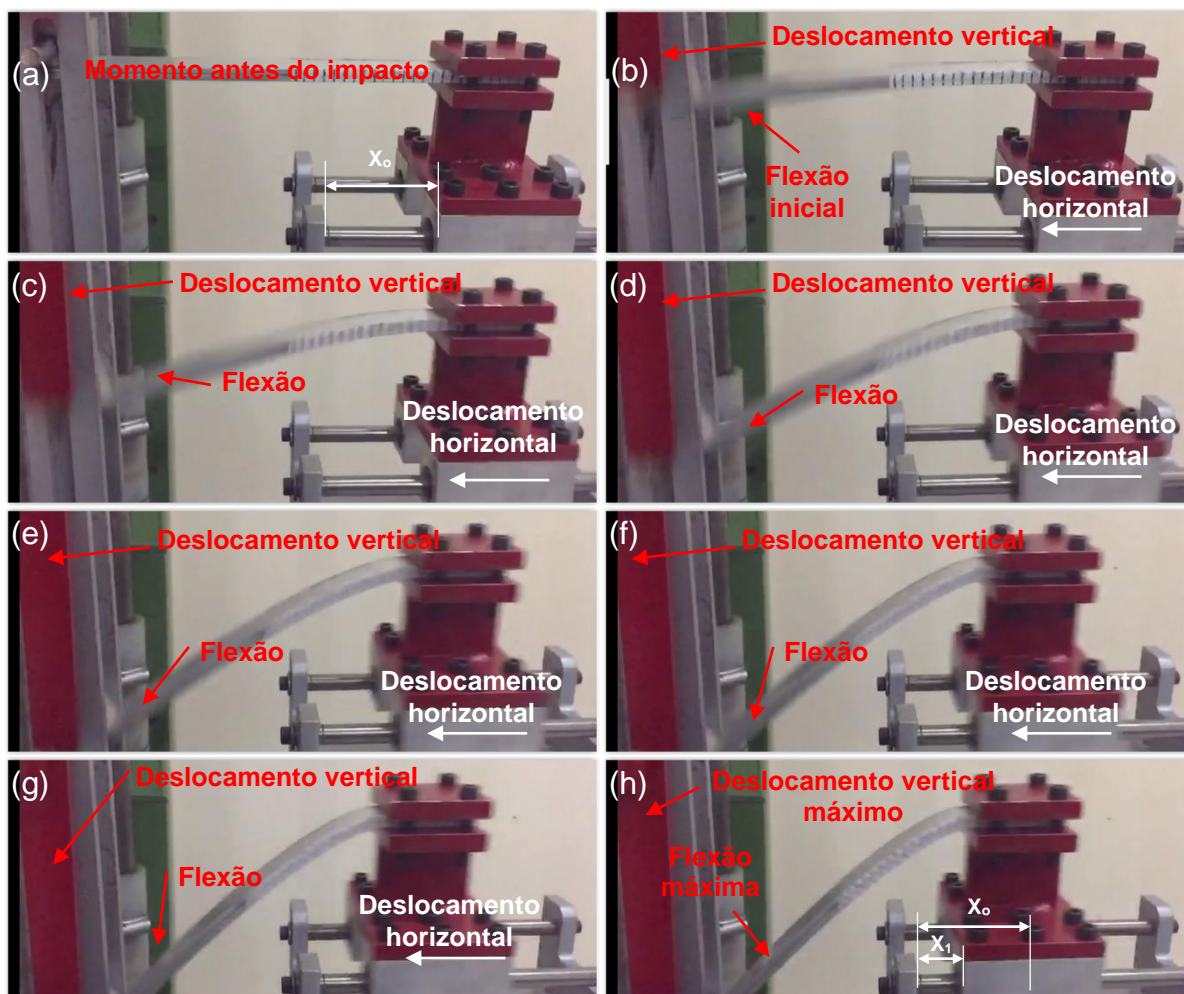
Foram confeccionados três corpos de prova em juntas adesivas de alumínio/epóxi, adotando condições de teste diferentes, conforme mostrado no Quadro 6.

Quadro 6 - Condições de teste dos corpos de prova ELS.

|          | Massa de impacto<br>(kg) | Altura de queda<br>(m) | Velocidade<br>(m/s) | Energia de<br>Impacto (J) |
|----------|--------------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|
| CP_ELS01 | 2,50                     | 0,3                    | 2,42                | 7,4                       |
| CP_ELS02 | 2,50                     | 0,5                    | 3,13                | 12,3                      |
| CP_ELS03 | 4,00                     | 0,5                    | 3,13                | 19,6                      |

É mostrado na Figura 97 a sequência de imagens do ensaio com o corpo de prova CP3, captando o momento antes do impacto (Figura 97a), a flexão do corpo de prova e o deslocamento vertical do impactador ao se chocar contra o pino de carga (Figuras 97b à 97g), e os máximos deslocamento vertical e flexão do corpo de prova (Figura 97h). Nas Figuras 97a e 97h foram feitas marcações delimitando o posicionamento horizontal inicial ( $x_0$ ) e final ( $x_1$ ) da extremidade engastada do corpo de prova, indicando que a medida que o corpo de prova é flexionado pela ação do impactador, há uma compensação do movimento no eixo horizontal.

Figura 97 - Quadro a quadro do ensaio ELS com o corpo de prova CP\_ELS03



Não foi possível acompanhar o crescimento da trinca de modo nítido, devido a limitações técnicas da câmera. Então analisou-se o comportamento do dispositivo e do corpo de prova durante o ensaio.

O dispositivo modo-II ELS dinâmico desenvolvido apresentou o comportamento esperado para a aplicação em ensaios de fratura interlaminar modo-II, isto é, após a fixação de uma das extremidades do corpo de prova ao dispositivo ELS, houve a aplicação da carga de impacto sobre o pino de carga colado a outra extremidade do corpo de prova, provocando a fratura interlaminar através do movimento de cisalhamento do corpo de prova. Então, a medida que o impactador se deslocava no eixo vertical, surgia um movimento de deslizamento entre os planos dos substratos que compõem a junta, causando o cisalhamento em sua interface adesiva. A Figura 98 mostra o corpo de prova CP\_ELS03 após o ensaio de fratura interlaminar modo-II ELS, mostrando o desalinhamento remanescente entre os traços laterais do corpo de prova.

Figura 98 – Corpo de prova CP\_ELS03 após ensaio de fratura modo-II ELS

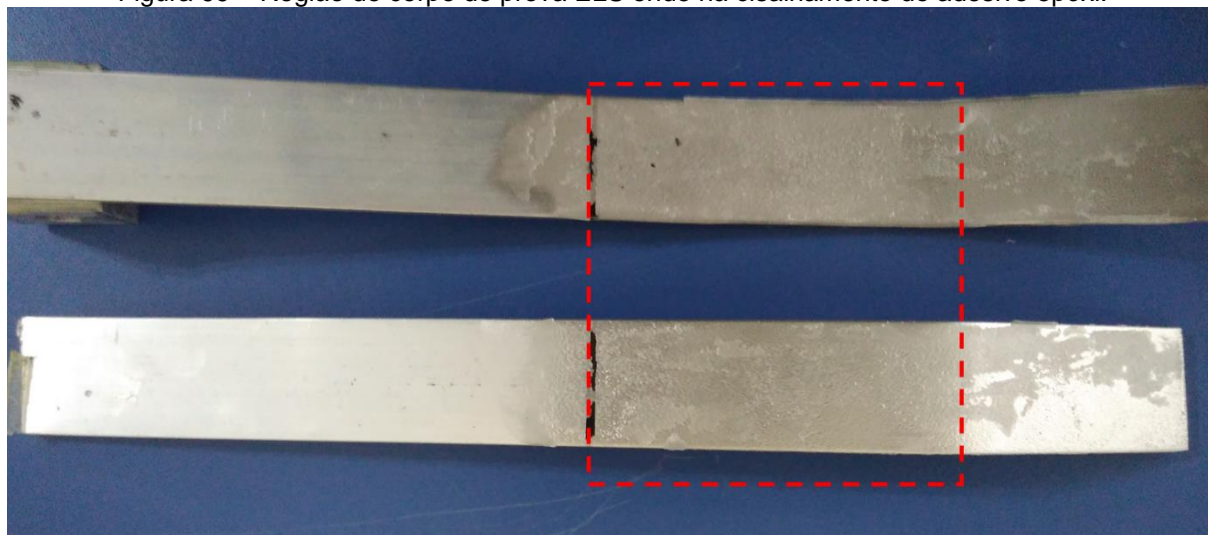


A análise do corpo de prova mostra que a fratura foi causada no adesivo devido à presença do mesmo em ambas as regiões dos substratos, não havendo simetria entre as regiões coladas e descoladas do adesivo presente entre os dois substratos do corpo de prova, como mostra a Figura 99.

Logo, o dispositivo de fratura interlaminar modo-II ELS dinâmico pode ser validado para uso em ensaios de fratura.

Pode-se concluir que o dispositivo de fratura interlaminar modo-II ELS dinâmico pode ser validado para uso em ensaios de fratura interlaminar modo-II, pois o dispositivo apresenta um comportamento típico de um ensaio modo-II ELS, e a análise do corpo de prova mostra a presença de esforços de cisalhamento causados pelo deslocamento vertical do impactador sobre o corpo de prova, acarretando no cisalhamento na interface da junta adesiva, causando uma fratura interlaminar modo-II.

Figura 99 – Região do corpo de prova ELS onde há cisalhamento do adesivo epóxi.



## **CAPÍTULO V**

### **5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

#### **5.1 Conclusões**

Após extensa pesquisa e análise de dezenas de dispositivos de ensaios para estudo de fratura interlaminar e suas respectivas metodologias de aplicação, concepção e fabricação de protótipos funcionais, seleção de metodologias de análises e concepção e produção de corpos de prova para testar o equipamento em desenvolvimento, pode-se concluir que:

- Foi possível o desenvolvimento e teste de dispositivos para ensaios de fratura interlaminar modo-I DCB e modo-II ELS dinâmicos, compostos por 15 (quinze) subsistemas, e para tanto foram gerados 33 (trinta e três) princípios de soluções.
- Baseado no extenso projeto informacional realizado, foi observado na literatura consultada a predominância dos ensaios: Double Cantilever Beam (DCB), para fratura interlaminar modo I, e End-Notched Flexure (ENF) e End Loaded Split (ELS) para fratura interlaminar modo II, e também foi percebido ver o crescente uso de ensaios de fratura interlaminar utilizando cargas dinâmicas.

#### **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

- Estudar tratamentos superficiais para melhorar a adesão entre o metal e o adesivo de juntas adesivas.
- Instrumentar a máquina de ensaio de impacto por queda de peso para obter dados quantitativos de tenacidade à fratura, utilizando os dispositivos desenvolvidos.
- Desenvolver uma garra para testar o dispositivo modo-II ELS em uma máquina universal de ensaios.

## REFERÊNCIAS

- ÁLVAREZ, D. et al. Mode II Fracture in Adhesive Joints. In: **Annual Meeting of the Adhesion Society**, 2013, Florida. Proceedings... Florida: 2013. p. 27-29.
- ASHCROFT, I.a.; HUGHES, D.j.; SHAW, S.j.. Mode I fracture of epoxy bonded composite joints: 1. Quasi-static loading. **International Journal Of Adhesion And Adhesives**, [s.l.], v. 21, n. 2, p.87-99, jan. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0143-7496\(00\)00038-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0143-7496(00)00038-5).
- ASTM D5528-13. **Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites**. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. West Conshohocken, 2013. 13 p.
- AUORE, Nicolas; JULIEN, Jumel. Double cantilever beam tests on a viscoelastic adhesive: effects of the loading rate. **Procedia Structural Integrity**, [s.l.], v. 2, p.269-276, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.035>.
- BIANCHI, Francesco; ZHANG, Xiang. Predicting mode-II delamination suppression in z-pinned laminates. **Composites Science And Technology**, [s.l.], v. 72, n. 8, p.924-932, maio 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.03.003>.
- BIDOKHTI, A. Abbaszadeh; SHAHANI, A. R.; FASAKHODI, M. R. Amini. Displacement-controlled crack growth in double cantilever beam specimen: A comparative study of different models. **Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, [s.l.], p.1-13, 7 abr. 2016. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0954406216642474>.
- BLACKMAN, B. R. K. et al. The failure of fibre composites and adhesively bonded fibre composites under high rates of test: Part I Mode I loading-experimental studies. **Journal Of Materials Science**, [s.l.], v. 30, n. 23, p.5885-5900, dez. 1995. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/bf01151502>.
- BLACKMAN, B. R. K. et al. The failure of fibre composites and adhesively bonded fibre composites under high rates of test: Part II Mode I loading —dynamic effects. **Journal Of Materials Science**, [s.l.], v. 31, n. 17, p.4451-4466, 1996. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/bf00366341>.
- BLACKMAN, B. R. K. et al. The failure of fibre composites and adhesively bonded fibre composites under high rates of test: Part III Mixed-mode I/II and mode II loadings. **Journal Of Materials Science**, [s.l.], v. 31, n. 17, p.4467-4477, 1996. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/bf00366342>.
- BLACKMAN, B.r.k et al. The calculation of adhesive fracture energies in mode I: revisiting the tapered double cantilever beam (TDCB) test. **Engineering Fracture Mechanics**, [s.l.], v. 70, n. 2, p.233-248, jan. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0013-7944\(02\)00031-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0013-7944(02)00031-0).
- BLACKMAN, B.r.k. et al. Measuring the mode I adhesive fracture energy, GIC, of structural adhesive joints: the results of an international round-robin. **International Journal Of Adhesion And Adhesives**, [s.l.], v. 23, n. 4, p.293-305, jan. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0143-7496\(03\)00047-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0143-7496(03)00047-2).
- BLACKMAN, B.r.k. et al. The fracture behaviour of adhesively-bonded composite joints: Effects of rate of test and mode of loading. **International Journal Of Solids And**



**Structures**, [s.l.], v. 49, n. 13, p.1434-1452, jun. 2012. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.02.022>.

BLACKMAN, B.r.k.; BRUNNER, A.j.; WILLIAMS, J.g.. Mode II fracture testing of composites: a new look at an old problem. **Engineering Fracture Mechanics**, [s.l.], v. 73, n. 16, p.2443-2455, nov. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.05.022>.

BLACKMAN, B.r.k.; KINLOCH, A.j.; PARASCHI, M.. The determination of the mode II adhesive fracture resistance, GIIC, of structural adhesive joints: an effective crack length approach. **Engineering Fracture Mechanics**, [s.l.], v. 72, n. 6, p.877-897, abr. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2004.08.007>.

BLANCO, N.; GAMSTEDT, E.k.; COSTA, J.. Mechanical hinge system for delamination tests in beam-type composite specimens. **Composites Science And Technology**, [s.l.], v. 68, n. 7-8, p.1837-1842, jun. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.01.011>.

Boeman R. G., Erdman D., Klett L., Lomax R. 1999. A PRACTICAL TEST METHOD FOR MODE I FRACTURE TOUGHNESS OF ADHESIVE JOINTS WITH DISSIMILAR SUBSTRATES. Proceedings of the SAMPE-ACCE-DOE Advanced Composite Conference, Detroit, MI, Sept. 27-28, 1999. 358-366.

BOTH J.; BARFUß D.; BAIER H. Mode II delamination of CFRP-metal laminates at bolted joints. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS**, 18., 2011, JEJU ISLAND, SOUTH KOREA, 2011. p. 1-5.

BOURKE, P. **Ballistic Impact on Composite Armour**, Doctor. Thesis, Cranfield University, Shrivenham, 2007.

BROUCKE, Bjorn van Den et al. FAILURE AND IMPACT MODELLING OF TEXTILE COMPOSITES: ITOOL PROJECT. **Sampe Europe: International Conference 2007 Paris**. Bélgica, p. 227-232. abr. 2007.

BROUGHTON, W. R., GOWER, M. R. L. Preparation and Testing of Adhesive Joints. NPL Measurement Good Practice Guide, No. 47, **National Physical Laboratory**, Teddington, United Kingdom, 2002.

BRUNNER, A.j. et al. **Mode II fatigue delamination resistance of advanced fiber-reinforced polymer–matrix laminates**: Towards the development of a standardized test procedure. *International Journal Of Fatigue*, [s.l.], v. 50, p.57-62, maio 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.02.021>.

BRUNNER, A.j.; BLACKMAN, B.r.k.; DAVIES, P.. A status report on delamination resistance testing of polymer–matrix composites. **Engineering Fracture Mechanics**, [s.l.], v. 75, n. 9, p.2779-2794, jun. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2007.03.012>.

CAIMMI, Francesco; FRASSINE, Roberto; PAVAN, Andrea. A new jig for mode II interlaminar fracture testing of composite materials under quasi-static and moderately high rates of loading. **Engineering Fracture Mechanics**, [s.l.], v. 73, n. 16, p.2277-2291, nov. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.05.002>.

CAMPILHO, R.d.s.g. et al. Fracture toughness determination of adhesive and co-cured joints in natural fibre composites. **Composites Part B: Engineering**, [s.l.], v. 50, p.120-126, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.01.025>.

CÂNDIDO, Geraldo Maurício et al. Fractografia de compósito estrutural aeronáutico submetido à caracterização de tenacidade à fratura interlaminar em modo

I. **Polímeros**, [s.l.], v. 22, n. 1, p.41-53, 2012. FapUNIFESP (SciELO).

<http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282012005000019>.

CARLSSON, L.A.; GILLESPIE, J.W.; PIPES, R.B. (1986), '**On the analysis and design of the endnotched flexure (ENF) specimen for mode II testing**', J Compos Mater, 20;594–604.

CARTIÉ, Denis D.r.; TROULIS, Manos; PARTRIDGE, Ivana K.. Delamination of Z-pinned carbon fibre reinforced laminates. **Composites Science And Technology**, [s.l.], v. 66, n. 6, p.855-861, maio 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.12.018>.

CLUTTON, E.q.. ESIS TC4 experience with the essential work of fracture method. **Fracture Of Polymers, Composites And Adhesives, Second Esis Tc4 Conference On Fracture Of Polymers, Composites And Adhesives**, [s.l.], p.187-199, 2000. Elsevier. [http://dx.doi.org/10.1016/s1566-1369\(00\)80018-7](http://dx.doi.org/10.1016/s1566-1369(00)80018-7).

COMPSTON, P. et al. The effect of matrix toughness and loading rate on the mode-II interlaminar fracture toughness of glass-fibre/vinyl-ester composites. **Composites Science And Technology**, [s.l.], v. 61, n. 2, p.321-333, fev. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0266-3538\(00\)00226-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0266-3538(00)00226-8).

COOK, Aaron Michael. **CHARACTERIZATION OF INTERLAMINAR FRACTURE IN COMPOSITE MATERIALS: A CASE STUDY APPROACH**. 2001. 251 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mechanical Engineering, Montana State University, Bozeman, Montana, 2001.

DANIEL, I. M.; YANIV, G.; AUSER, J. W.. Rate Effects on Delamination Fracture Toughness of Graphite/Epoxy Composites. **Composite Structures 4**, [s.l.], p.258-272, 1987. Springer Netherlands. [http://dx.doi.org/10.1007/978-94-009-3457-3\\_20](http://dx.doi.org/10.1007/978-94-009-3457-3_20).

DAVIES, P. et al. **Comparison of test configurations for determination of mode II interlaminar fracture toughness results from international collaborative test programme**. Plastics, Rubber And Composites, [s.l.], v. 28, n. 9, p.432-437, set. 1999. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1179/146580199101540600>.

DAVIES, P.; BLACKMAN, B. R. K.; BRUNNER, A. J.. Standard Test Methods for Delamination Resistance of Composite Materials: Current Status. **Applied Composite Materials**, [s.l.], v. 5, n. 6, p.345-364, 1998. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1008869811626>.

DOURADO, N. et al. Bone fracture characterization using the end notched flexure test. **Materials Science And Engineering: C**, [s.l.], v. 33, n. 1, p.405-410, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msec.2012.09.006>.

DRANSFIELD, Kimberley; BAILLIE, Caroline; MAI, Yiu-wing. Improving the delamination resistance of CFRP by stitching—a review. **Composites Science And Technology**, [s.l.], v. 50, n. 3, p.305-317, jan. 1994. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0266-3538\(94\)90019-1](http://dx.doi.org/10.1016/0266-3538(94)90019-1).

GEORGIU, I. et al. Rate Dependent Fracture Behaviour of Adhesively Bonded Joints. **European Structural Integrity Society**, [s.l.], p.317-328, 2003. Elsevier. [http://dx.doi.org/10.1016/s1566-1369\(03\)80105-x](http://dx.doi.org/10.1016/s1566-1369(03)80105-x).

GRIFFITH, Alan Arnold. **The phenomena of rupture and flow in solids**. Philosophical Transactions of The Royal Society of London, London, v. 221, p.163-198, 26 fev. 1920.

HASHEMI, S.; KINLOCH, A. J.; WILLIAMS, J. G.. The Analysis of Interlaminar Fracture in Uniaxial Fibre-Polymer Composites. **Proceedings Of The Royal Society A: Mathematical**,

**Physical and Engineering Sciences**, [s.l.], v. 427, n. 1872, p.173-199, 8 jan. 1990. The Royal Society. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1990.0007>.

HINTIKKA, P.; WALLIN, M; SAARELA, O.. **The effect of moisture on the interlaminar fracture toughness of CFRP laminate**. 27th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences. Nice, France, 19–24 September 2010, paper no. ICAS2010-8.3ST1.

ILYAS, Muhammad. **Damage modeling of carbon epoxy laminated composites submitted to impact loading**. 2010. 241 f. Tese (Doutorado) - Curso de Génie Mécanique, Institut Supérieur de L'aéronautique Et de L'espace, Toulouse, France, 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15024**: Fibre-reinforced plastic composites -- Determination of mode I interlaminar fracture toughness, GIC, for unidirectionally reinforced materials. 1 ed. Suíça, 2001. 24 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15114**: Fibre-reinforced plastic composites -- Determination of the mode II fracture resistance for unidirectionally reinforced materials using the calibrated end-loaded split (C-ELS) test and an effective crack length approach. 1 ed. Suíça, 2014. 18 p.

JAIN, Lalit K.; DRANSFIELD, Kimberley A.; MAI, Yiu-wing. On the effects of stitching in CFRPs—II. Mode II delamination toughness. **Composites Science And Technology**, [s.l.], v. 58, n. 6, p.829-837, jan. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0266-3538\(97\)00186-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0266-3538(97)00186-3).

JIA, Deng et al. Experimental Study of the Fracture of the Bonding Interface between the EPDM Films. **Proceedings Of The First International Conference On Information Sciences, Machinery, Materials And Energy**, [s.l.], p.1519-1525, 2015. Atlantis Press. <http://dx.doi.org/10.2991/icismme-15.2015.320>.

JOHNSON, Ws et al. Static and Dynamic Mode II Strain Energy Release Rates in Toughened Thermosetting Composite Laminates. **Journal Of Composites Technology And Research**, [s.l.], v. 14, n. 1, p.37-42, 1992. ASTM International. <http://dx.doi.org/10.1520/ctr10081j>.

KAGEYAMA, K et al. Mode I and Mode II Delamination Growth of Interlayer Toughened Carbon/Epoxy (T800H/3900-2) Composite System. **Composite Materials: Fatigue and Fracture**, [s.l.], p.19-19, 1995. ASTM International. <http://dx.doi.org/10.1520/stp14006s>.

LIU, Hongquan. **PLY CLUSTERING EFFECT ON COMPOSITE LAMINATES UNDER LOW-VELOCITY IMPACT USING FEA**. 2012. 101 f. Dissertação (Mestrado) – Projeto de Aeronave, Cranfield University, Reino Unido, 2012.

MADHUKAR, Madhu S.; DRZAL, Lawrence T.. Fiber-Matrix Adhesion and Its Effect on Composite Mechanical Properties: IV. Mode I and Mode II Fracture Toughness of Graphite/Epoxy Composites. **Journal Of Composite Materials**, [s.l.], v. 26, n. 7, p.936-968, jul. 1992. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/002199839202600701>.

MAIKUMA, Hironori; GILLESPIE, John W.; WILKINS, Dick J.. Mode II Interlaminar Fracture of the Center Notch Flexural Specimen under Impact Loading. **Journal Of Composite Materials**, [s.l.], v. 24, n. 2, p.124-149, fev. 1990. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/002199839002400201>.

MARIBONDO, J. F.. **Desenvolvimento de uma metodologia de projeto de sistemas modulares, aplicada a unidades de processamento de resíduos sólidos domiciliares**.



2000. 301 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

MARZI, Stephan; BIEL, Anders; STIGH, Ulf. On experimental methods to investigate the effect of layer thickness on the fracture behavior of adhesively bonded joints. **International Journal Of Adhesion And Adhesives**, [s.l.], v. 31, n. 8, p.840-850, dez. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.08.004>.

MENEZES, Marizilda dos Santos; PASCHOARELLI, Luis Carlos; MOURA, Mônica (Org.). **Metodologia em design: inter-relacoes**. São Paulo: Estação das Letras e Cores, 2011. 344 p.

MOHAN, J.; IVANKOVIĆ, A.; MURPHY, N.. **Effect of prepreg storage humidity on the mixed-mode fracture toughness of a co-cured composite joint**. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, [s.l.], v. 45, p.23-34, fev. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.09.010>.

MOORE, D.r.; PAVAN, A.; WILLIAMS, J.g.. **Fracture Mechanics Testing Methods for Polymers, Adhesives and Composites**. Reino Unido. Elsevier, 2001. 375 p.

MOURA, M.f.s.f. de. Interlaminar mode II fracture characterization. **Delamination Behaviour Of Composites**, [s.l.], p.310-326, 2008. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1533/9781845694821.3.310>.

MOURA, M.f.s.f. de; MORAIS, A.b. de. Equivalent crack based analyses of ENF and ELS tests. **Engineering Fracture Mechanics**, [s.l.], v. 75, n. 9, p.2584-2596, jun. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2007.03.005>.

OLIVEIRA, Jorge M.q.; MOURA, Marcelo F.s.f. de; MORAIS, José J.l.. Application of the end loaded split and single-leg bending tests to the mixed-mode fracture characterization of wood. **Holzforschung**, [s.l.], v. 63, n. 5, p.597-602, 1 jan. 2009. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.1515/hf.2009.088>.

PARDOEN, T. et al. Constraint effects in adhesive joint fracture. **Journal Of The Mechanics And Physics Of Solids**, [s.l.], v. 53, n. 9, p.1951-1983, set. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmps.2005.04.009>.

PENNAS, D.; CANTWELL, W.j.. The Influence of Loading Rate on the Mode III Interlaminar Fracture Toughness of Composite/Steel Bi-material Systems. **Journal Of Composite Materials**, [s.l.], v. 43, n. 20, p.2255-2268, 5 ago. 2009. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0021998309094964>.

PEREIRA, F.a.m. et al. Fracture characterization of bone under mode II loading using the end loaded split test. **Journal Of The Mechanical Behavior Of Biomedical Materials**, [s.l.], v. 4, n. 8, p.1764-1773, nov. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2011.05.033>.

POHLIT II, David J. **Dynamic Mixed-Mode Fracture of Bonded Composite Joints for Automotive Crashworthiness**. 2007. 184 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Virginia Polytechnic Institute And State University, Virginia, 2007.

PRASAD, M.s. Sham; VENKATESHA, C.s.; JAYARAJU, T.. Experimental Methods of Determining Fracture Toughness of Fiber Reinforced Polymer Composites under Various Loading Conditions. **Journal Of Minerals And Materials Characterization And Engineering**, [s.l.], v. 10, n. 13, p.1263-1275, 2011. Scientific Research Publishing, Inc.,. <http://dx.doi.org/10.4236/jmmce.2011.1013099>.

PROMBUT, P. et al. **Delamination of multidirectional composite laminates at 0°/θ° ply interfaces**. Engineering Fracture Mechanics, [s.l.], v. 73, n. 16, p.2427-2442, nov. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.05.013>.

RANADE, Shantanu R. et al. A tapered bondline thickness double cantilever beam (DCB) specimen geometry for combinatorial fracture studies of adhesive bonds. **International Journal Of Adhesion And Adhesives**, [s.l.], v. 55, p.155-160, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.08.006>.

RIKARDS, R. et al. Mode I, mode II, and mixed-mode I/II interlaminar fracture toughness of GFRP influenced by fiber surface treatment. **Mechanics Of Composite Materials**, [s.l.], v. 32, n. 5, p.439-462, set. 1996. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02313863>.

ROBINSON, P.; HODGKINSON, J.m.. **Interlaminar fracture toughness**. Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites, [s.l.], p.170-210, 2000. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1533/9781855738911.170>.

SANKAR, Bhavani V.; SHARMA, Suresh K.. Mode II delamination toughness of stitched graphite/epoxy textile composites. **Composites Science And Technology**, [s.l.], v. 57, n. 7, p.729-737, 1997. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0266-3538\(97\)00032-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0266-3538(97)00032-8).

SEVCIK, M. et al. Analytical model of asymmetrical Mixed-Mode Bending test of adhesively bonded GFRP joint. **Fracture And Structural Integrity**, [s.l.], n. 34, p.216-225, 28 set. 2015. Gruppo Italiano Frattura. <http://dx.doi.org/10.3221/IGF-ESIS.34.23>.

SHEDDEN, James. **Simplifying the Testing and Calculation of Fracture Toughness of Thermoplastic and Thermoset Matrix Composite Materials**. 2013. 24 f. TCC (Graduação) - Curso de Materials Engineering, Materials Engineering Department, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2013.

SHIVAKUMAR, Kunigal N et al. Assessment of mode-II fracture tests for unidirectional fiber reinforced composite laminates. **Journal Of Reinforced Plastics And Composites**, [s.l.], v. 34, n. 23, p.1905-1925, 19 out. 2015. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0731684415602335>.

SILVA, Lucas F. M. da; MAGALHÃES, António G. de; MOURA, Marcelo F. S. F. de. **Juntas Adesivas Estruturais**. Porto: Publindústria, 2007. 358 p.

SILVA, M.A.L. et al. Estudo por elementos finitos do provete End Loaded Split (ELS), para a determinação experimental de GIIC na espécie de madeira Pinus Pinaster. **Revista Mecânica Experimental**, nº12, pp. 39-48, 2002.

SILVA, M.a.l. et al. Mode II wood fracture characterization using the ELS test. **Engineering Fracture Mechanics**, [s.l.], v. 74, n. 14, p.2133-2147, set. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.10.012>.

SIMÓN, Joshua C.. **Response and Failure of Adhesively Bonded Automotive Composite Structures under Impact Loads**. 2004. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute And State University, Blacksburg, Virginia, 2004.

SMILEY, A.j.; PIPES, R.b.. Rate Effects on Mode I Interlaminar Fracture Toughness in Composite Materials. **Journal Of Composite Materials**, [s.l.], v. 21, n. 7, p.670-687, jul. 1987. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/002199838702100706>.

SMILEY, A.j.; PIPES, R.b.. Rate sensitivity of mode II interlaminar fracture toughness in graphite/epoxy and graphite/PEEK composite materials. **Composites Science And**

**Technology**, [s.l.], v. 29, n. 1, p.1-15, jan. 1987. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0266-3538\(87\)90033-9](http://dx.doi.org/10.1016/0266-3538(87)90033-9).

STAMOULIS, G. et al. On the experimental mixed-mode failure of adhesively bonded metallic joints. **International Journal Of Adhesion And Adhesives**, [s.l.], v. 51, p.148-158, jun. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.03.002>.

SUN, C. et al. Rate effects for mixed-mode fracture of plastically-deforming, adhesively-bonded structures. **International Journal Of Adhesion And Adhesives**, [s.l.], v. 29, n. 4, p.434-443, jun. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.09.003>.

SUN, Xiannian et al. Effect of stitch distribution on mode I delamination toughness of laminated DCB specimens. **Composites Science And Technology**, [s.l.], v. 64, n. 7-8, p.967-981, jun. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2003.07.004>.

SVENNINGGAAR, Jon. **Development of a test tool for evaluation of cohesive zone parameters in DCB composite specimens**. 2014. 185 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Aalborg University, Aalborg, 2014.

SZEKRÉNYES, András; UJ, József. Mode-II Fracture in E-glass-polyester Composite. **Journal Of Composite Materials**, [s.l.], v. 39, n. 19, p.1747-1768, 14 jun. 2005. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0021998305051120>.

TAYLOR, J. M. et al. Mode I and mode II fracture behavior of carbon/glass hybrid filament wound resin transfer moulded composites. In: **EUROPEAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS**, 16., 2014, Seville, Spain, 2014. p. 1-8.

TESSARO, Claudio Aragão. **Desenvolvimento e validação de um dispositivo para ensaio de delaminação modo I**. 2016. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

TRABELSI, Walid; MICHEL, Laurent; OTHOMENE, Renaud. Effects of Stitching on Delamination of Satin Weave Carbon-Epoxy Laminates Under Mode I, Mode II and Mixed-Mode I/II Loadings. **Applied Composite Materials**, [s.l.], v. 17, n. 6, p.575-595, 17 mar. 2010. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10443-010-9128-0>.

VERDIERE, M Colin de. **Damage and strain rate optical characterisation of standard and tufted non crimp fabric carbon composites for Meso-scale impact models**. 2009. 275 f. Tese (Ph.D.), Cranfield University, Reino Unido, 2009.

VERDIERE, M. Colin de et al. Influence of loading rate on the delamination response of untufted and tufted carbon epoxy non crimp fabric composites: Mode I. **Engineering Fracture Mechanics**, [s.l.], v. 96, p.11-25, dez. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.05.015>.

VERDIERE, M. Colin de et al. Influence of loading rate on the delamination response of untufted and tufted carbon epoxy non-crimp fabric composites/Mode II. **Engineering Fracture Mechanics**, [s.l.], v. 96, p.1-10, dez. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2011.12.011>.

VILLAVERDE, Norbert Blanco. **VARIABLE MIXE-MODE DELAMINATION IN COMPOSITE LAMINATE UNDER FATIGUE CONDITIONS: TESTING AND ANALYSIS**. 2004. 297 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Dpt. D'enginyeria Mecànica I de La Construcció Industrial, Universitat de Girona, Girona, 2004.

WANG, H.; VU-KHANH, T.. **Use of end-loaded-split (ELS) test to study stable fracture behaviour of composites under mode II loading.** Composite Structures, [s.l.], v. 36, n. 1-2, p.71-79, set. 1996. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0263-8223\(96\)00066-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0263-8223(96)00066-9).

WANG, Wen-xue et al. Experimental investigation on test methods for mode II interlaminar fracture testing of carbon fiber reinforced composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s.l.], v. 40, n. 9, p.1447-1455, set. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.04.029>.

WILLIAMS, J.g.. Large Displacement and End Block Effects in the 'DCB' Interlaminar Test in Modes I and II. **Journal Of Composite Materials**, [s.l.], v. 21, n. 4, p.330-347, abr. 1987. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/002199838702100403>.

WOOD, M et al. **The effect of stitch distribution on Mode I delamination toughness of stitched laminated composites** – experimental results and FEA simulation. Composites Science And Technology, [s.l.], v. 67, n. 6, p.1058-1072, maio 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.06.002>.

WOOD, Michael D.k. et al. A New ENF Test Specimen for the Mode II Delamination Toughness Testing of Stitched Woven CFRP Laminates. **Journal Of Composite Materials**, [s.l.], v. 41, n. 14, p.1743-1772, jul. 2007. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0021998306069890>.

WU, Xiang-fa; DZENIS, Yuris A.. Determination of dynamic delamination toughness of a graphite-fiber/epoxy composite using Hopkinson pressure bar. **Polymer Composites**, [s.l.], v. 26, n. 2, p.165-180, 2005. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/pc.20093>.

XU, Shuangyan. **Evaluating Thermal and Mechanical Properties of Electrically Conductive Adhesives for Electronic Applications.** Dissertation, Engineering Science and Mechanics, Virginia Tech, Blacksburg, VA, 2002.

YIAN, Zhao; KEEY, Seah Leong; BOAY, Chai Gin. Effects of seawater exposure on mode II fatigue delamination growth of a woven E-glass/bismaleimide composite. **Journal Of Reinforced Plastics And Composites**, [s.l.], v. 35, n. 2, p.138-150, 19 out. 2015. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0731684415609139>.

YOUSEFI, Jalal et al. Delamination characterization in composite laminates using acoustic emission features, micro visualization and finite element modeling. **Journal Of Composite Materials**, [s.l.], v. 50, n. 22, p.3133-3145, 28 jul. 2016. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0021998315615691>.

ZHANG, Ye. **Fracture and Fatigue of Adhesively-Bonded Fiber-Reinforced Polymer Structural Joints.** 2010. 206 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doctoral En Structures, École polytechnique fédérale de Lausanne, Suíça, 2010.





APÊNDICE A – Quadro com informações de trabalhos acadêmicos sobre o tema fratura interlaminar (continuação).

| ANO  | TRABALHO ACADÊMICO  | TIPO DE ENSAIO DE FRATURA |         |     |     |     |     |            |     | AUTORES   |             |
|------|---|---------------------------|---------|-----|-----|-----|-----|------------|-----|-----------|-------------|
|      |   | MODE I                    | MODE-II |     |     |     |     | MODO MISTO |     |           |             |
|      |   | DCB                       | 4ENF    | CNF | ELS | ENF | ONF | SLB        | MMB | AUTOR 1   | AUTOR 2     |
| 2010 | Development Of A Test Procedure For Mode II Fatigue Delamination Resistance Of Advanced Fibre-Reinforced Polymer-Matrix Laminates |                           |         |     | X   | X   |     |            |     | Brunner   | Stelzer     |
| 2009 | Displacement-Controlled Crack Growth In Double Cantilever Beam Specimen - A Comparative Study Of Different Models                 | X                         |         |     |     |     |     |            |     | Bidokhti  | Shahani     |
| 2006 | DISSERTAÇÃO - Automotive Crashworthiness of Adhesively Bonded Carbon Fiber Polymer Composite Structures                           | X                         |         |     | X   |     |     |            |     | Jacob     |             |
| 2014 | DISSERTAÇÃO - Determinação Da Tenacidade À Fratura Em Corte (Giic) De Adesivos Estruturais Pelo Ensaio End-Notched Flexure (ENF)  | X                         |         |     |     | X   |     |            |     | Azevedo   |             |
| 2016 | Double Cantilever Beam Tests On A Viscoelastic Adhesive: Effects Of The Loading Rate  | X                         |         |     |     |     |     |            |     | Aurore    | Julien      |
| 2001 | Dynamic Delamination Fracture Toughness In Unidirectional Polymeric Composites  |                           |         |     |     | X   |     |            |     | Tsai      | Guo         |
| 2009 | Dynamic Delamination Of Aeronautic Structural Composites By Using Cohesive Finite Elements  | X                         |         |     | X   |     |     |            | X   | Ilyas     | Lachaud     |
| 2002 | Dynamic Mode II Delamination Fracture Of Unidirectional Graphite Epoxy Composites   |                           |         | X   |     | X   |     |            |     | Nwosu     | Hui         |
| 2012 | Effect Of Prepreg Storage Humidity On The Mixed-Mode Fracture Toughness Of A Co-Cured Composite Joint                             | X                         |         |     | X   |     |     |            | X   | Mohan     | Ivankovic   |
| 2004 | Effect Of Stitch Distribution On Mode I Delamination Toughness Of Laminated DCB Specimens   | X                         |         |     |     |     |     |            |     | Sun       | Tong        |
| 2007 | Effect Of Tufting On The Response Of Non Crimp Fabric Composites  | X                         |         |     | X   |     |     |            |     | Verdiere  | Pickett     |
| 2009 | Effects Of Mode-I And Mode-II Interlaminar Fracture Toughness On The Energy Absorption Of CFRP Twill/Weave Composite Box Sections | X                         |         |     |     | X   |     |            |     | Hadavinia | Ghasemnejad |
| 2015 | Effects Of Seawater Exposure On Mode Ii Fatigue Delamination Growth Of A Woven E-Glass-Bismaleimide Composite                     |                           |         |     |     | X   |     |            |     | Yian      | Keey        |





APÊNDICE A – Quadro com informações de trabalhos acadêmicos sobre o tema fratura interlaminar (continuação).

| ANO  | TRABALHO ACADÊMICO  | TIPO DE ENSAIO DE FRATURA |         |     |     |     |     |            |     | AUTORES    |            |
|------|---|---------------------------|---------|-----|-----|-----|-----|------------|-----|------------|------------|
|      |   | MODE I                    | MODE-II |     |     |     |     | MODO MISTO |     |            |            |
|      |   | DCB                       | 4ENF    | CNF | ELS | ENF | ONF | SLB        | MMB | AUTOR 1    | AUTOR 2    |
| 1992 | Improving The Delamination Resistance Of CFRP By Stitching A Review   | X                         |         |     |     |     |     |            |     | Dransfield | Baillie    |
| 2012 | Influence Of Loading Rate On The Delamination Response Of Untufted And Tufted Carbon Epoxy Non Crimp Fabric Composites: Mode I  | X                         |         |     |     |     |     |            |     | Verdiere   | Skordos    |
| 2012 | Influence Of Loading Rate On The Delamination Response Of Untufted And Tufted Carbon Epoxy Non-Crimp Fabric Composites: Mode II |                           |         |     | X   |     |     |            |     | Verdiere   | Skordos    |
|      | Interlaminar Fracture Toughness   | X                         |         |     | X   | X   |     |            |     | Robinson   | Hodgkinson |
| N/A  | Interlaminar Mode II Fracture Characterization  |                           |         |     | X   | X   |     |            |     | Moura      |            |
| 2001 | ISO 15024   | X                         |         |     |     |     |     |            |     | ISO        |            |
| 2014 | ISO 15114-2014 (PREVIEW)  |                           |         |     | X   |     |     |            |     | ISO        |            |
| 1985 | Large Displacement and End Block Effects in the 'DCB' Interlaminar Test in Modes I and II                                       | X                         |         |     | X   |     |     |            |     | Williams   |            |
| 2001 | LIVRO - Fracture mechanics testing methods for polymers, adhesives and composites   | X                         |         |     | X   |     |     |            |     | Moore      | Pavan      |
| 2007 | LIVRO - Juntas Adesivas Estruturais   | X                         | X       |     | X   | X   |     |            | X   | Da silva   | Magalhães  |
| 2001 | Measurement Good Practice Guide No. 47 - Preparation and Testing of Adhesive Joints   | X                         |         |     | X   | X   |     |            |     | Broughton  | Gower      |
| 2003 | Measuring the mode I adhesive fracture energy, GIC, of structural adhesive joints the results of an international round-robin   | X                         |         |     |     |     |     |            |     | Blackman   | Kinloch    |
| 2007 | Mechanical hinge system for delamination tests in beam-type composite specimens   | X                         |         |     |     |     |     |            | X   | Blanco     | Gamstedt   |
| N/A  | Mixed-Mode Fracture in Adhesively-Bonded Joints   | X                         |         |     |     |     |     |            | X   | Álvarez    | Blackman   |
| 1995 | Mode I and Mode II Delamination Growth of Interlayer Toughened Carbon/Epoxy (T800H3900-2) Composite System                      | X                         |         |     |     | X   |     |            |     | Kageyama   | Kimpara    |

APÊNDICE A – Quadro com informações de trabalhos acadêmicos sobre o tema fratura interlaminar (continuação).

| ANO  | TRABALHO ACADÊMICO  | TIPO DE ENSAIO DE FRATURA |         |     |     |     |     |            |     | AUTORES  |           |
|------|---|---------------------------|---------|-----|-----|-----|-----|------------|-----|----------|-----------|
|      |   | MODE I                    | MODE-II |     |     |     |     | MODO MISTO |     |          |           |
|      |   | DCB                       | 4ENF    | CNF | ELS | ENF | ONF | SLB        | MMB | AUTOR 1  | AUTOR 2   |
| 2014 | Mode I and mode II fracture behavior of carbon/glass hybrid filament wound resin transfer moulded composites  | X                         |         |     | X   |     |     |            |     | Taylor   | Frenz     |
| 2000 | Mode I fracture of epoxy bonded composite joints 1. Quasi-static loading  | X                         |         |     |     |     |     |            |     | Ashcroft | Hughes    |
| 1996 | Mode I, Mode Ii, And Mixed-Mode I/Ii Interlaminar Fracture Toughness Of GFRP Influenced By Fiber Surface Treatment                                      | X                         |         |     |     | X   |     |            | X   | Rikards  | Buchhoiz  |
| 2011 | Mode II Delamination Of CFRP-Metal Laminates At Bolted Joints   |                           |         |     |     | X   |     |            |     | Both     | Barfuß    |
| 1997 | Mode II Delamination Toughness Of Stitched Graphite/Epoxy Textile Composites  |                           |         |     |     | X   |     |            |     | Sankar   | Sharma    |
| 2013 | Mode II fatigue delamination resistance of advanced fiber-reinforced polymer–matrix laminates: Towards the development of a standardized test procedure |                           |         |     | X   | X   |     |            |     | Brunner  | Stelzer   |
| N/A  | Mode II Fracture in Adhesive Joints   |                           |         |     | X   |     |     |            |     | Álvarez  | Blackman  |
| 2004 | Mode II Fracture in E-glass–polyester Composite   |                           |         |     | X   |     | X   |            |     | Rényes   | Uj        |
| 2006 | Mode II Fracture Testing Of Composites A New Look At An Old Problem   |                           |         |     | X   |     |     |            |     | Blackman | Brunner   |
| 2007 | Mode Ii Interlaminar Fracture Investigation Of Novel Shaped Glass Fibre Composites  |                           |         |     | X   | X   |     |            |     | Cannas   | Bond      |
| 1988 | Mode II Interlaminar Fracture of the Center Notch Flexural Specimen under Impact Loading  |                           |         | X   |     |     |     |            |     | Maikuma  | Gillespie |
| 2010 | Mode II Interlaminar Fracture Toughness and Fatigue Characterization of a Graphite Epoxy Composite Material   |                           |         |     |     | X   |     |            |     | O’brien  | Johnston  |
| 2007 | Mode II wood fracture characterization using the ELS test   |                           |         |     | X   |     |     |            |     | Silva    | Morais    |
| 2011 | On Experimental Methods to Investigate the Effect of Layer Thickness on the Fracture Behaviour of Adhesively Bonded Joints                              | X                         |         |     |     | X   |     |            |     | Marzi    | Biel      |
| 1985 | On the Analysis and Design of the End Notched Flexure (ENF) Specimen for Mode II Testing  |                           |         |     |     | X   |     |            |     | Carlsson | Gillespie |



APÊNDICE A – Quadro com informações de trabalhos acadêmicos sobre o tema fratura interlaminar (continuação).

| ANO  | TRABALHO ACADÊMICO  | TIPO DE ENSAIO DE FRATURA |         |     |     |     |     |            |     | AUTORES       |          |
|------|---|---------------------------|---------|-----|-----|-----|-----|------------|-----|---------------|----------|
|      |   | MODE I                    | MODE-II |     |     |     |     | MODO MISTO |     |               |          |
|      |   | DCB                       | 4ENF    | CNF | ELS | ENF | ONF | SLB        | MMB | AUTOR 1       | AUTOR 2  |
| 1987 | Rate Sensitivity of Mode II Interlaminar Fracture Toughness in Graphite/Epoxy and Graphite/PEEK Composite Materials                           |                           |         |     |     | X   |     |            |     | Smiley        | Pipes    |
| 2009 | Review - Experimental investigation on test methods for mode II interlaminar fracture testing of carbon fiber reinforced composites           |                           | X       |     | X   | X   | X   |            |     | Wang          | Nakata   |
| 2013 | Simplifying the Testing and Calculation of Fracture Toughness of Thermoplastic and Thermoset Matrix Composite Materials                       | X                         |         |     | X   | X   |     |            | X   | Shedden       | London   |
| N/A  | SLIDES - Development And Evaluation Of Fracture Mechanics Test Methods For Sandwich Composites  | X                         |         |     |     |     |     |            |     | Kessler       | Adams    |
|      | SLIDES - Tópicos de Pesquisa  | X                         |         |     |     |     |     |            |     | Donadon       |          |
| 1998 | Standard Test Methods for Delamination Resistance of Composite Materials: Current Status  | X                         |         |     | X   | X   |     |            | X   | Davies        | Blackman |
| 1992 | Static and Dynamic Mode II Strain Energy Release Rates in Toughened Thermosetting Composite Laminates   |                           |         |     |     | X   |     |            |     | Cairns        |          |
| 2007 | TESE - Ballistic Impact On Composite Armour   | X                         |         |     |     |     |     |            |     | Bourke        | Horsfall |
| 2001 | TESE - Characterization Of Interlaminar Fracture In Composite Materials - A Case Study Approach   | X                         |         |     |     | X   |     |            |     | Cook          |          |
| 2009 | TESE - Damage and strain rate optical characterisation of standard and tufted non crimp fabric carbon composites for Meso-scale impact models | X                         |         |     | X   | X   |     |            |     | Verdiere      |          |
| 2010 | TESE - Damage modeling of carbon epoxy laminated composites submitted to impact loading   | X                         |         |     | X   | X   |     |            | X   | Ilyas         |          |
| 2014 | TESE - Development of a test tool for evaluation of cohesive zone parameters in DCB composite specimens                                       | X                         |         |     |     |     |     |            |     | Svenninggaard |          |
| 2007 | TESE - Dynamic Mixed-Mode Fracture of Bonded Composite Joints for Automotive Crashworthiness  | X                         | X       |     | X   |     |     | X          |     | Pohlit        | Dillard  |
| 2010 | TESE - Fracture and Fatigue of Adhesively-Bonded Fiber-Reinforced Polymer Structural Joints   | X                         |         |     | X   |     |     |            |     | Zhang         |          |

APÊNDICE A – Quadro com informações de trabalhos acadêmicos sobre o tema fratura interlaminar (continuação).

| ANO  | TRABALHO ACADÊMICO  | TIPO DE ENSAIO DE FRATURA |         |     |     |     |     |            |     | AUTORES  |           |
|------|---|---------------------------|---------|-----|-----|-----|-----|------------|-----|----------|-----------|
|      |   | MODE I                    | MODE-II |     |     |     |     | MODO MISTO |     |          |           |
|      |   | DCB                       | 4ENF    | CNF | ELS | ENF | ONF | SLB        | MMB | AUTOR 1  | AUTOR 2   |
| 2012 | TESE - Ply Clustering Effect On Composite Laminates Under Low-Velocity Impact Using FE  | X                         |         |     |     | X   |     |            |     | Liu      | Zhang     |
| 2004 | TESE - Response and Failure of Adhesively Bonded Automotive Composite Structures under Impact Loads   | X                         |         |     | X   |     |     | X          |     | Simón    | Dillard   |
| 1997 | Test Methods for Adhesive Fracture Properties Overall Summary   | X                         |         |     |     |     |     |            |     | Tomczyk  |           |
| 1990 | The analysis of interlaminar fracture in uniaxial fibre-polymer composites  | X                         |         |     | X   | X   |     |            |     | Hashemi  | Kinloch   |
| 2003 | The Calculation Of Adhesive Fracture Energies In Mode I - Revisiting The Tapered Double Cantilever Beam (TDCB) Test.                          | X                         |         |     |     |     |     |            |     | Blackman | Hadavinia |
| 2005 | The determination of the mode II adhesive fracture resistance, GIIC, of structural adhesive joints An effective crack length approach         |                           |         |     | X   |     |     |            |     | Blackman | Kinloch   |
| 2000 | The effect of matrix toughness and loading rate on the mode-II interlaminar fracture toughness of glass-fibre/vinyl-ester composites          |                           |         |     |     | X   |     |            |     | Compston | Jar       |
| 2010 | The Effect Of Moisture On The Interlaminar Fracture Toughness Of CFRP Laminate  | X                         |         |     |     | X   |     |            |     | Hintikka | Wallin    |
| 2007 | The effect of stitch distribution on Mode I delamination toughness of stitched laminated composites – experimental results and FEA simulation | X                         |         |     |     |     |     |            |     | Wood     | Sun       |
|      | The Effects Of Test Rate On The Fracture Behaviour Of Adhesively Bonded Joints  | X                         |         |     |     |     |     |            |     | Blackman | Kinloch   |
| 2012 | The fracture behaviour of adhesively-bonded composite joints Effects of rate of test and mode of loading                                      | X                         |         |     | X   | X   |     |            | X   | Blackman | Kinloch   |
| 2000 | The impact wedge-peel performance of structural adhesives   | X                         |         |     |     |     |     |            |     | Blackman | Kinloch   |
| 1995 | The Influence of Loading Rate on the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Composite Materials   |                           |         |     |     | X   |     |            |     | Cantwell |           |

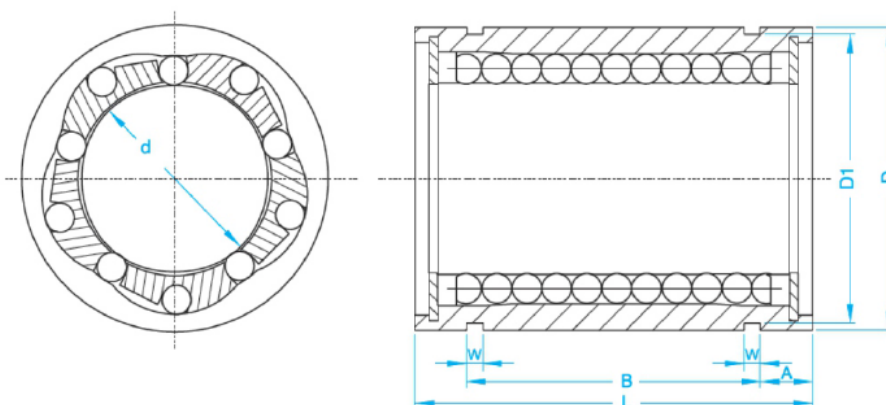
APÊNDICE A – Quadro com informações de trabalhos acadêmicos sobre o tema fratura interlaminar (continuação).

| ANO  | TRABALHO ACADÊMICO   | TIPO DE ENSAIO DE FRATURA |         |     |     |     |     |            |     | AUTORES          |          |
|------|--|---------------------------|---------|-----|-----|-----|-----|------------|-----|------------------|----------|
|      |  | MODE I                    | MODE-II |     |     |     |     | MODO MISTO |     |                  |          |
|      |  | DCB                       | 4ENF    | CNF | ELS | ENF | ONF | SLB        | MMB | AUTOR 1          | AUTOR 2  |
| 2015 | Traction-Separation Relation In Delamination Of Cross-Ply Laminates - Experimental Characterization And Numerical Modeling | X                         |         |     |     |     |     |            |     | Farmand-ashtiani | Cugnoni  |
| 1996 | Use of end-loaded-split (ELS) test to study stable fracture behaviour of composites under mode II loading                  |                           |         |     | X   |     |     |            |     | Wang             | Vu-khanh |
| 2004 | Variable Mixe-Mode Delamination In Composite Laminate Under Fatigue Conditions: Testing And Analysis                       | X                         |         |     | X   | X   |     |            |     | Villaverde       |          |

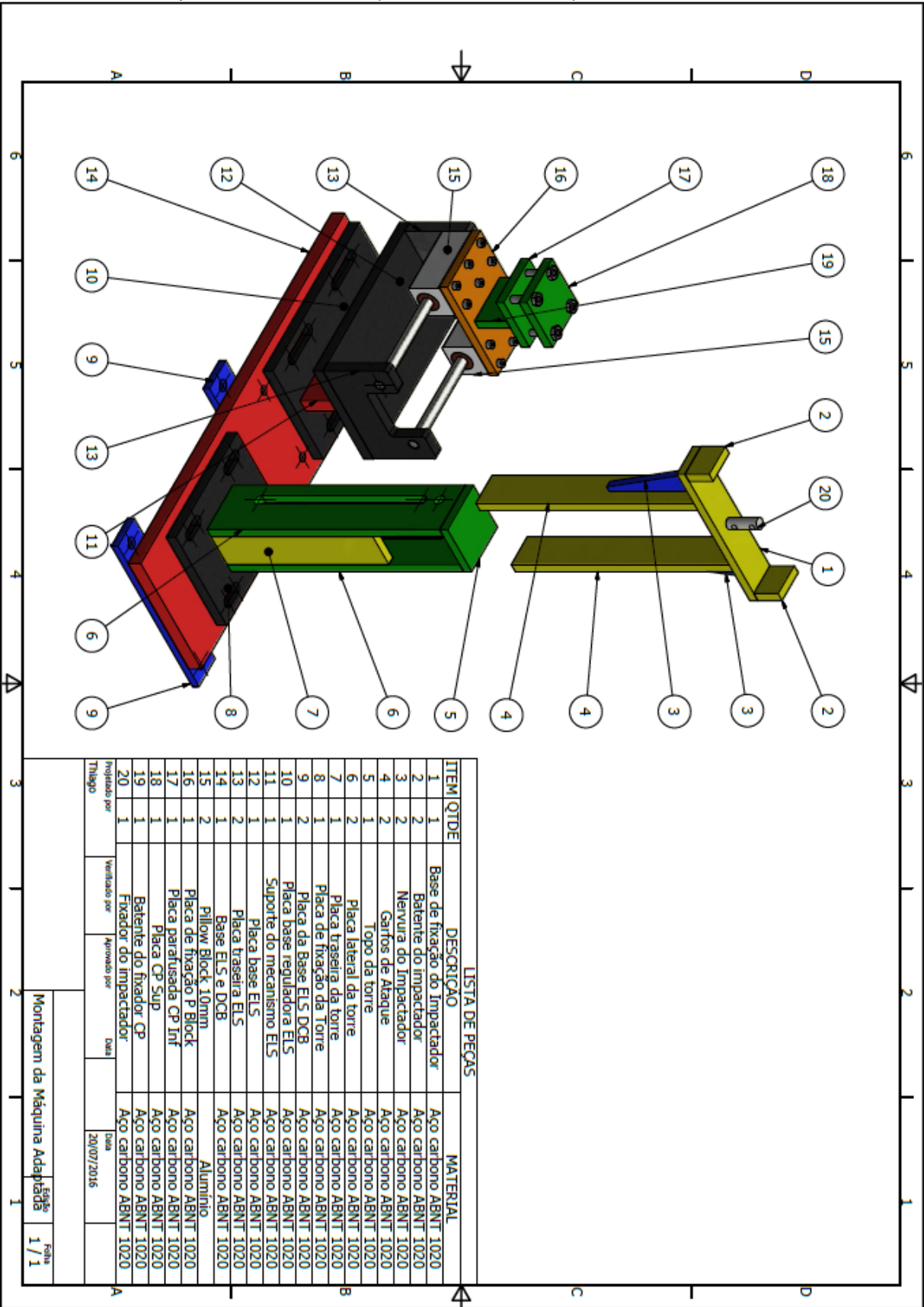
## ANEXOS

## ANEXO A – propriedades mecânicas dos rolamentos lineares da KALATEC AUTOMAÇÃO

| MODELO | DIMENSÃO BÁSICA |    |  |     |                                     |      |      |      |      | MODELO (Kgf)                                     |   | PESO (g) |
|--------|-----------------|----|--|-----|-------------------------------------|------|------|------|------|--|---|----------|
|        | d               | D  | <small>Tolerância (µm)</small><br>D              | L   | <small>Tolerância (µm)</small><br>L | W    | D1   | B    | A    | <small>Capacidade de carga Dinâmica (Ca)</small> | <small>Capacidade de carga Estática (Coa)</small> |          |
| LM8UU  | 8               | 15 | $\begin{smallmatrix} 0 \\ -11 \end{smallmatrix}$ | 24  | 0                                   | 1.1  | 14.3 | 17.5 | 3.35 | 27   | 41  | 16       |
| LM10UU | 10              | 19 | $\begin{smallmatrix} 0 \\ -11 \end{smallmatrix}$ | 29  | -20                                 | 1.3  | 18   | 22   | 3.5  | 38   | 55  | 30       |
| LM12UU | 12              | 21 | -13  | 30  |                                     | 1.3  | 20   | 23   | 3.5  | 42   | 60  | 31.5     |
| LM16UU | 16              | 28 |  | 37  |                                     | 1.6  | 27   | 26.5 | 5.25 | 78   | 119   | 69       |
| LM20UU | 20              | 32 | 0  | 42  |                                     | 1.6  | 30.5 | 30.5 | 5.75 | 83   | 140   | 87       |
| LM25UU | 25              | 40 | -16  | 59  |                                     | 1.85 | 38   | 41   | 9    | 100  | 159   | 220      |
| LM30UU | 30              | 45 |  | 64  | 0                                   | 1.85 | 43   | 44.5 | 9.75 | 159  | 279   | 250      |
| LM40UU | 40              | 60 | 0  | 80  | -30                                 | 2.1  | 57   | 60.5 | 9.75 | 219  | 409   | 585      |
| LM50UU | 50              | 80 | -19  | 100 |                                     | 2.6  | 76.5 | 74   | 13   | 389  | 808   | 1580     |

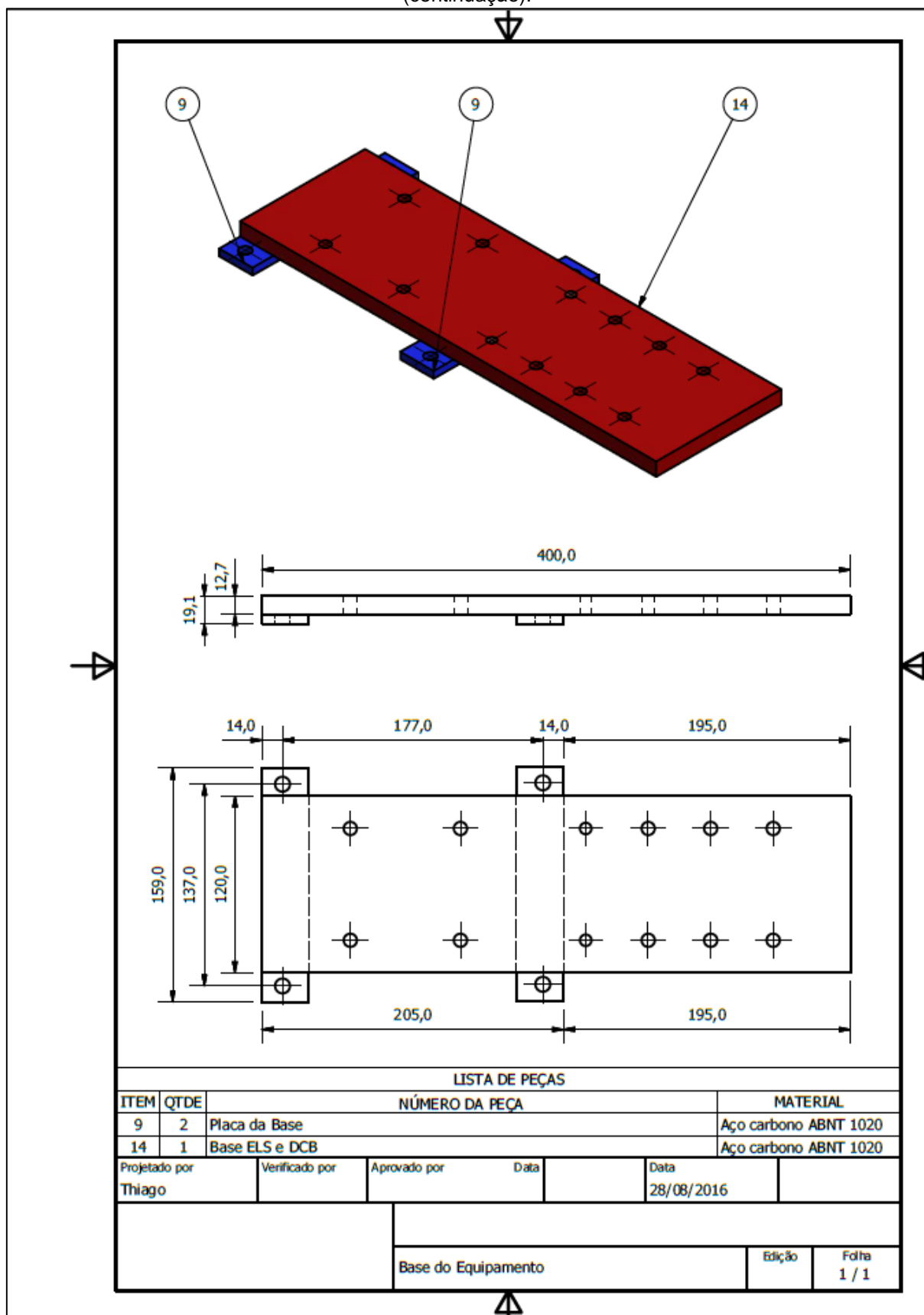


ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar

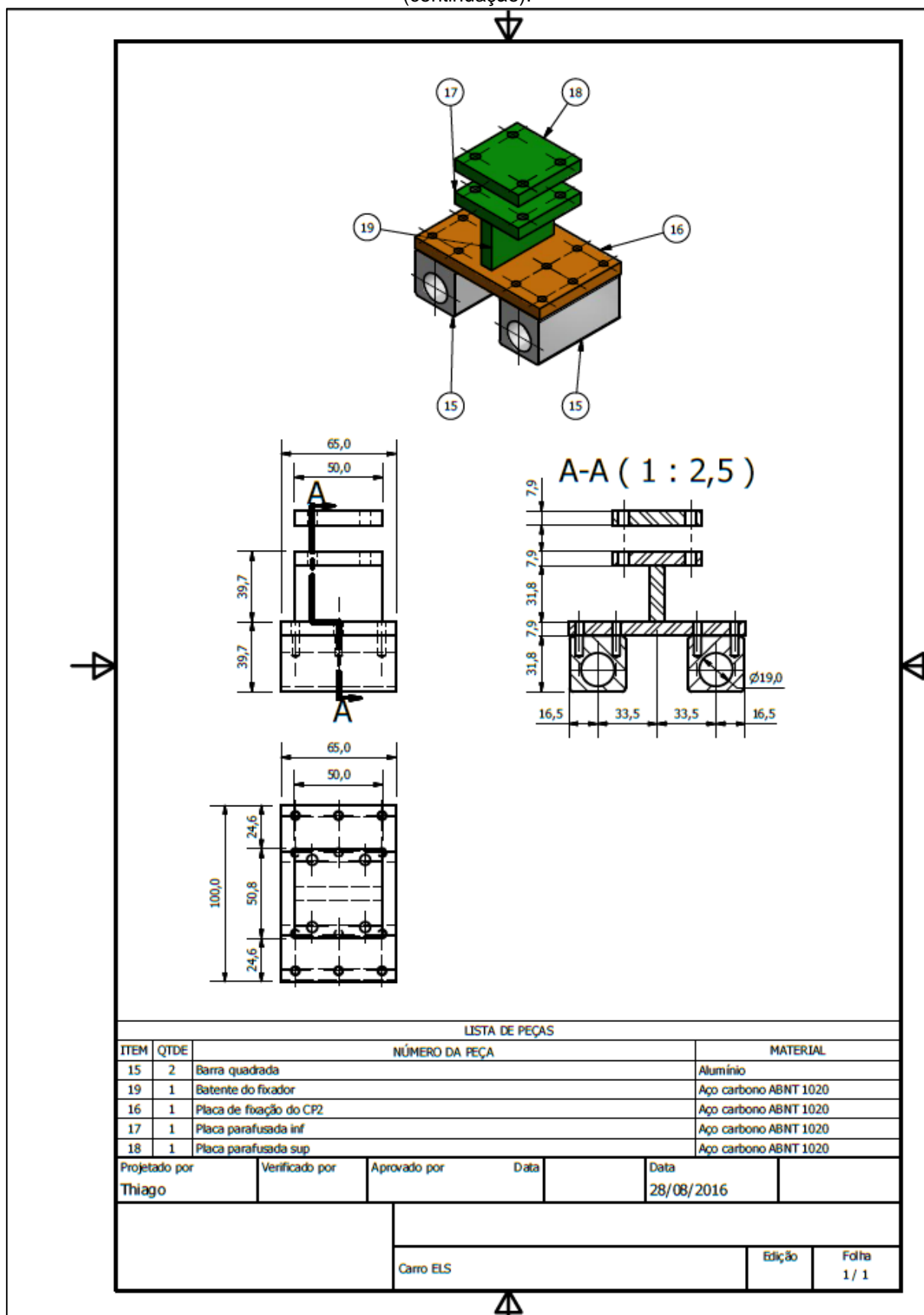




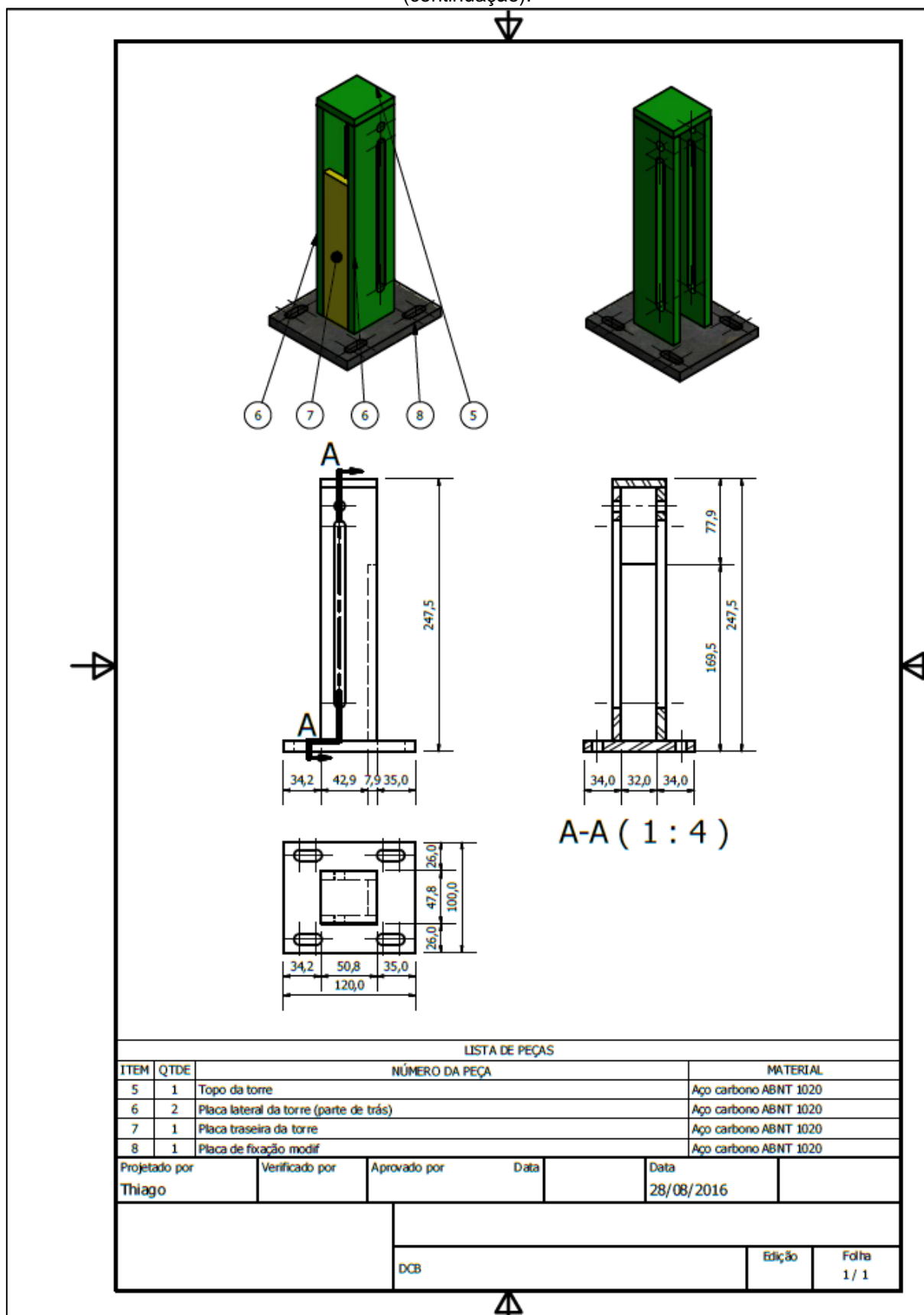
ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar (continuação).



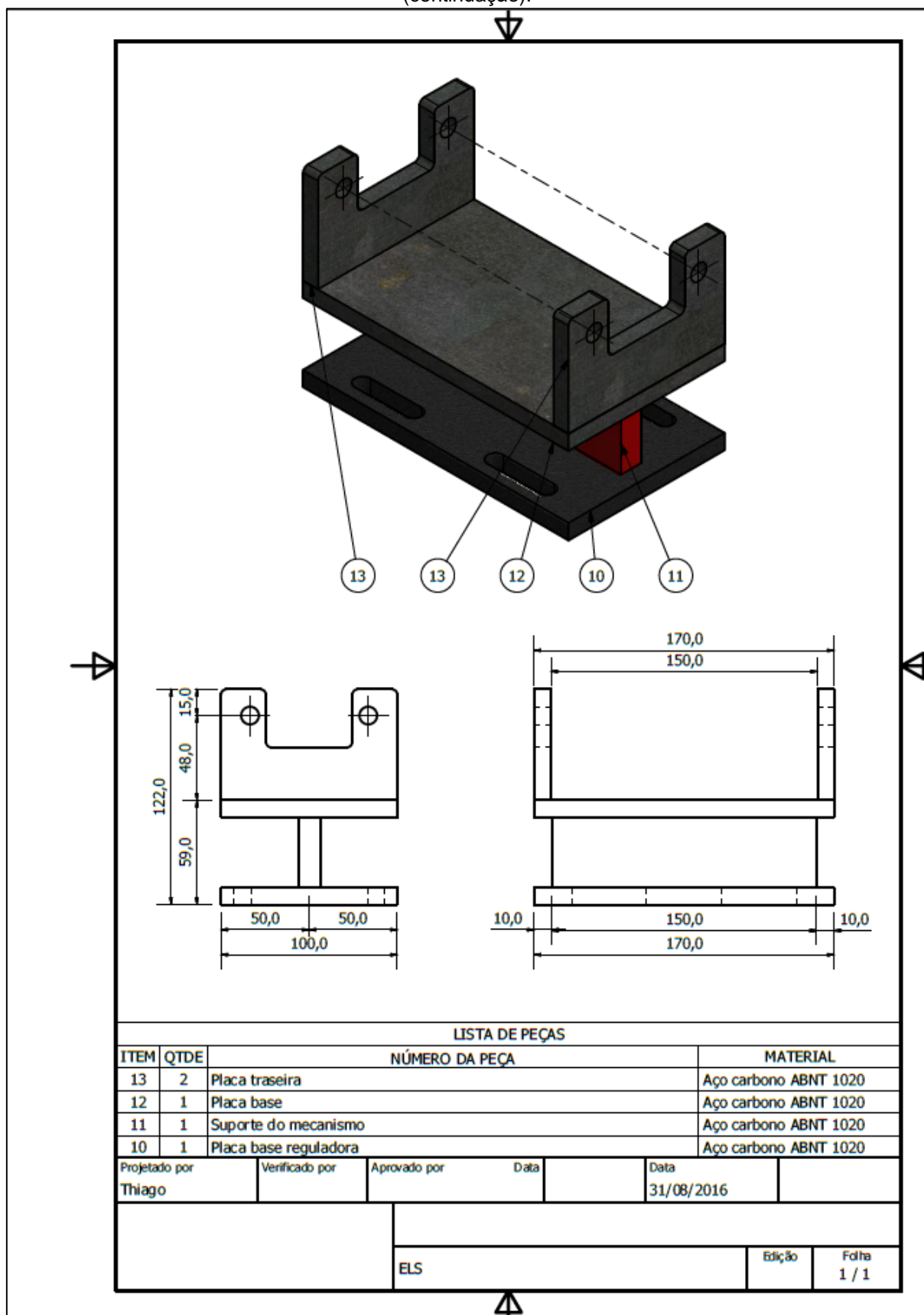
ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar (continuação).



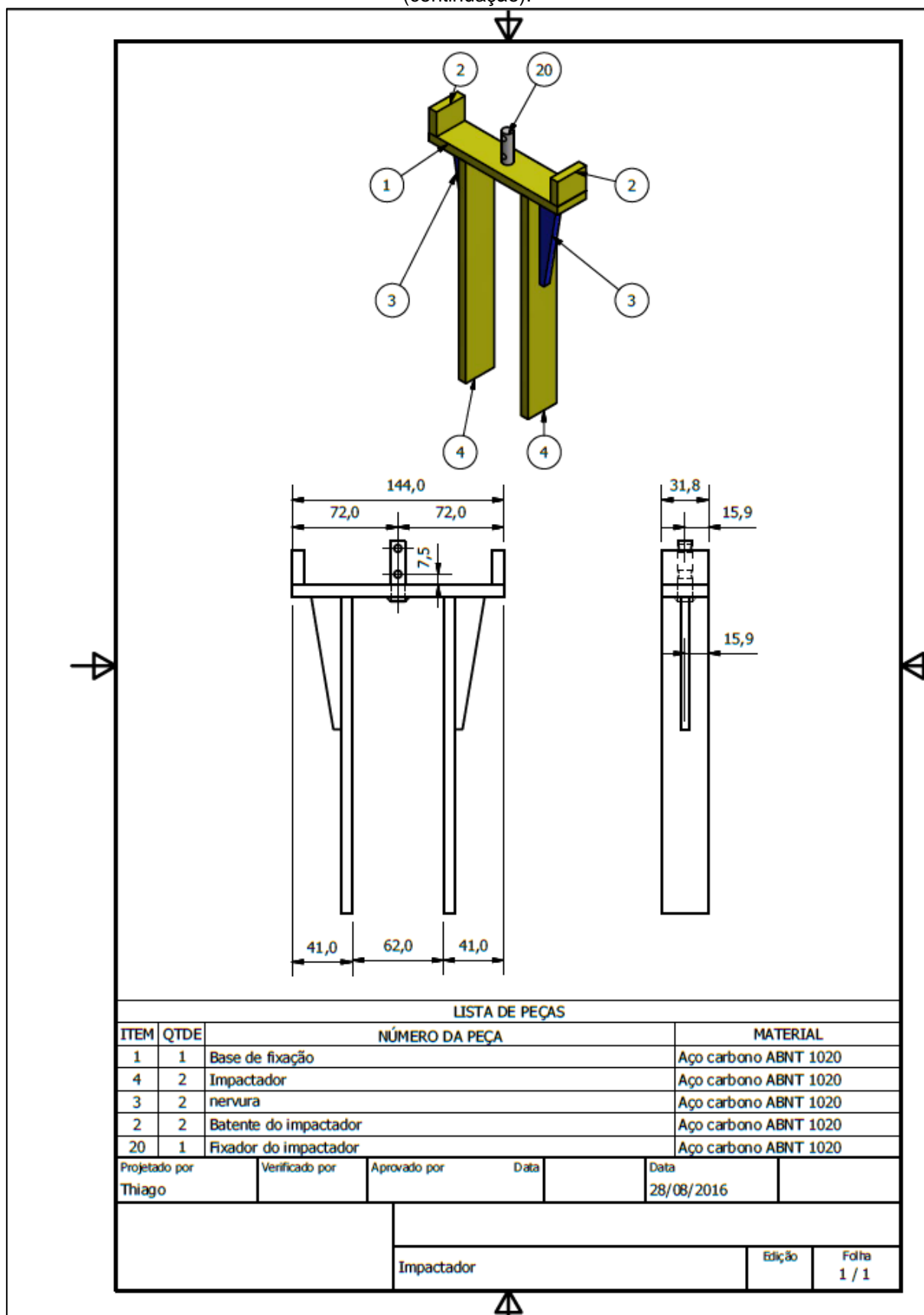
ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar (continuação).



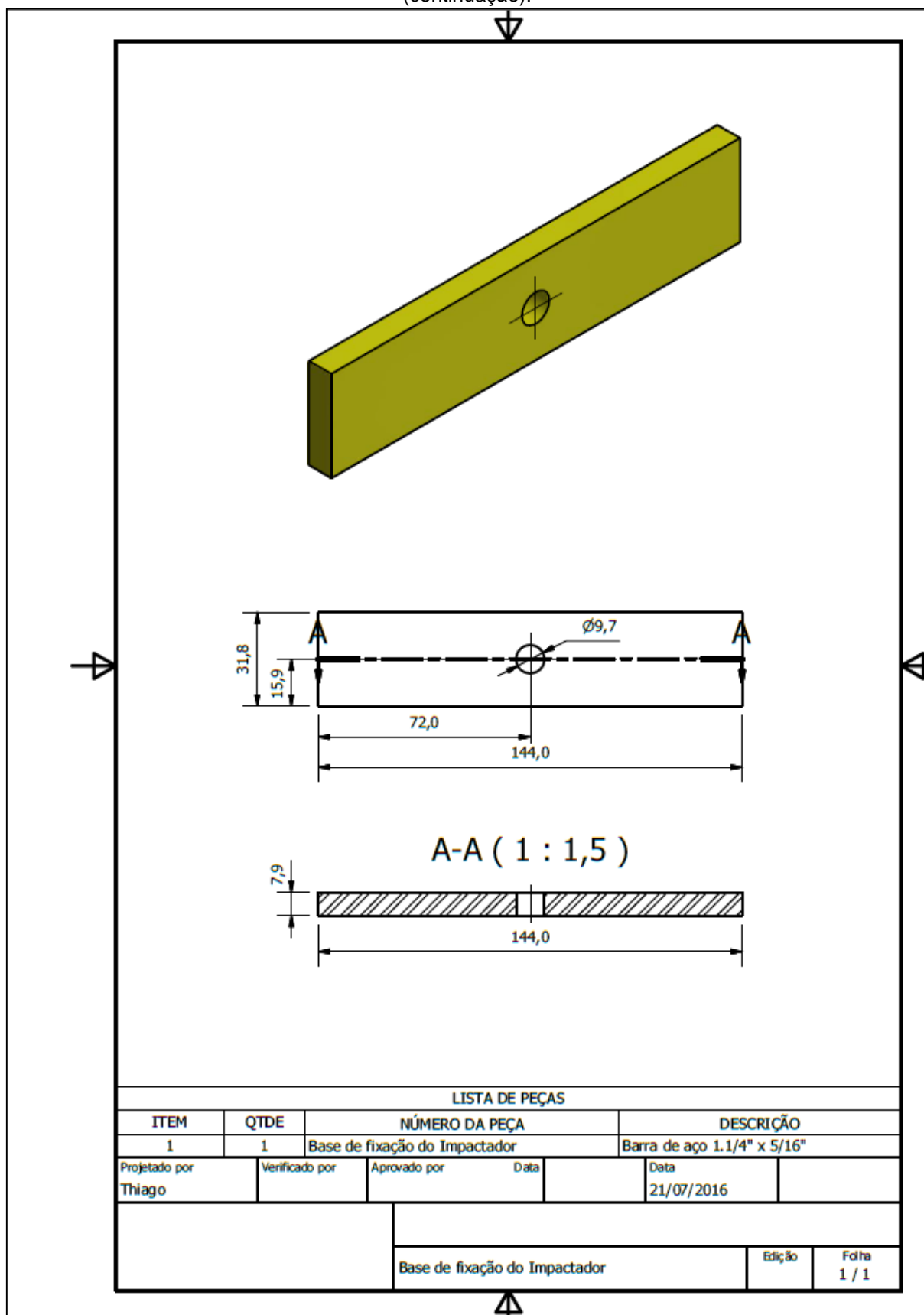
ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar (continuação).



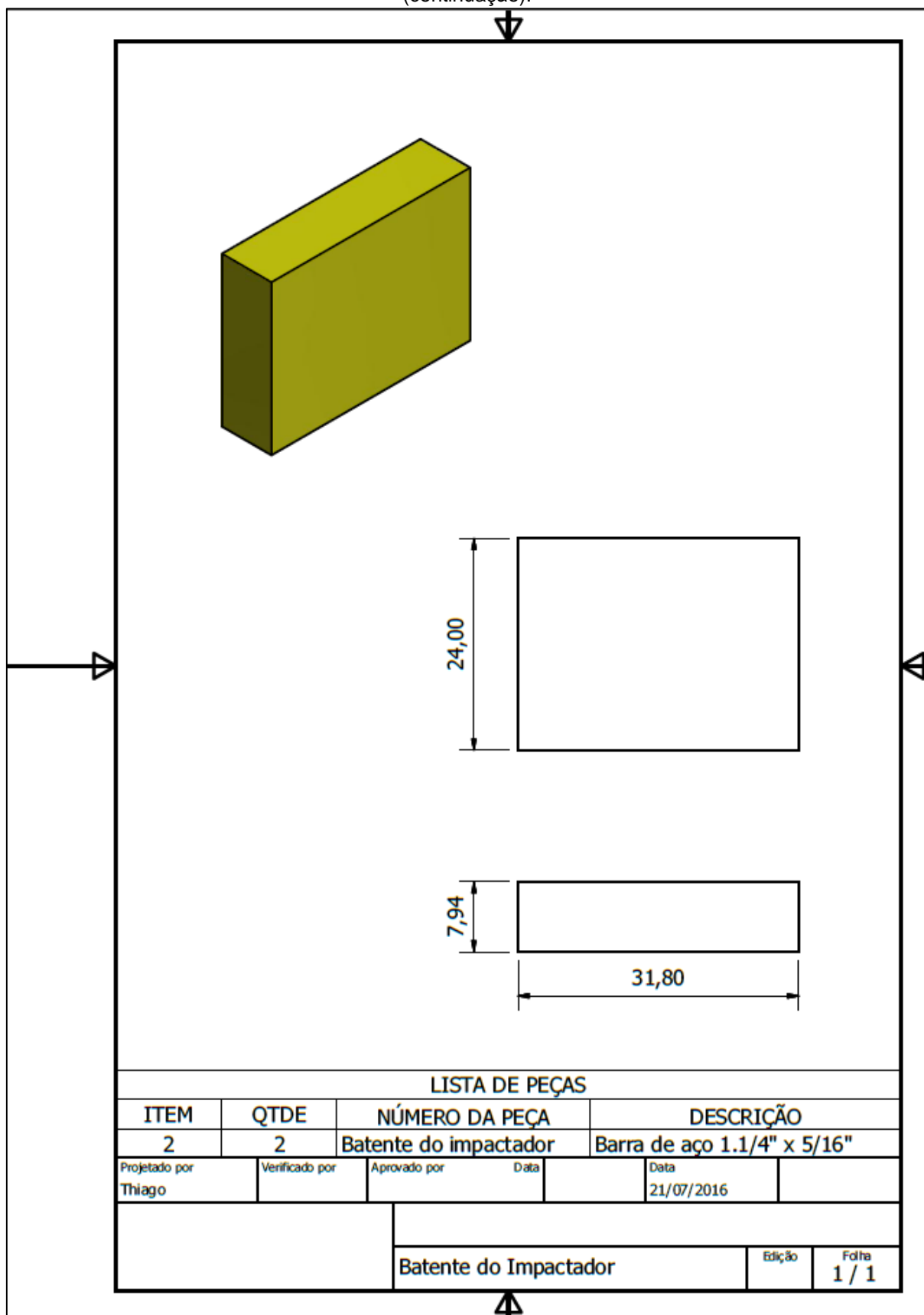
ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar (continuação).



ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar (continuação).

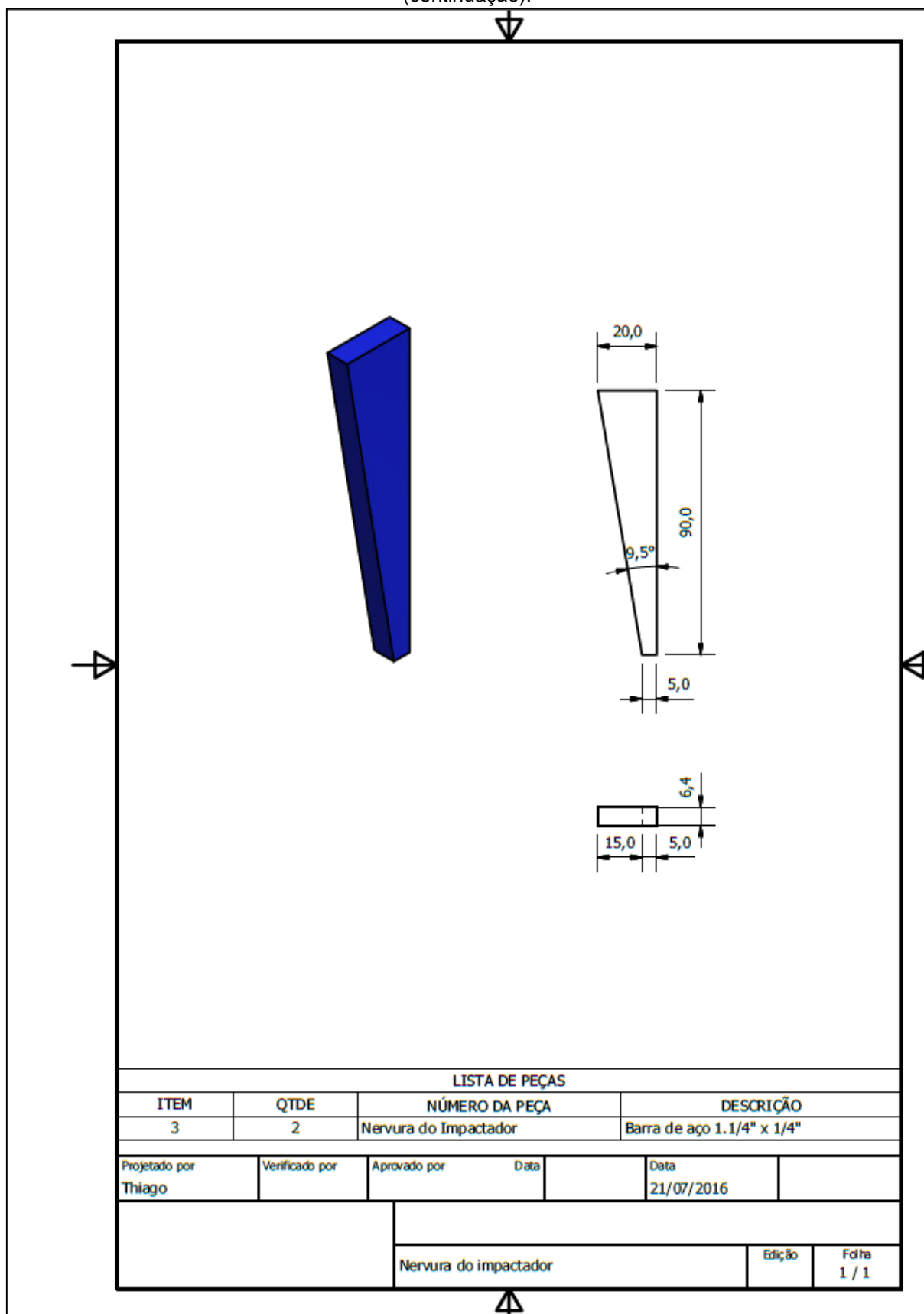


ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar (continuação).

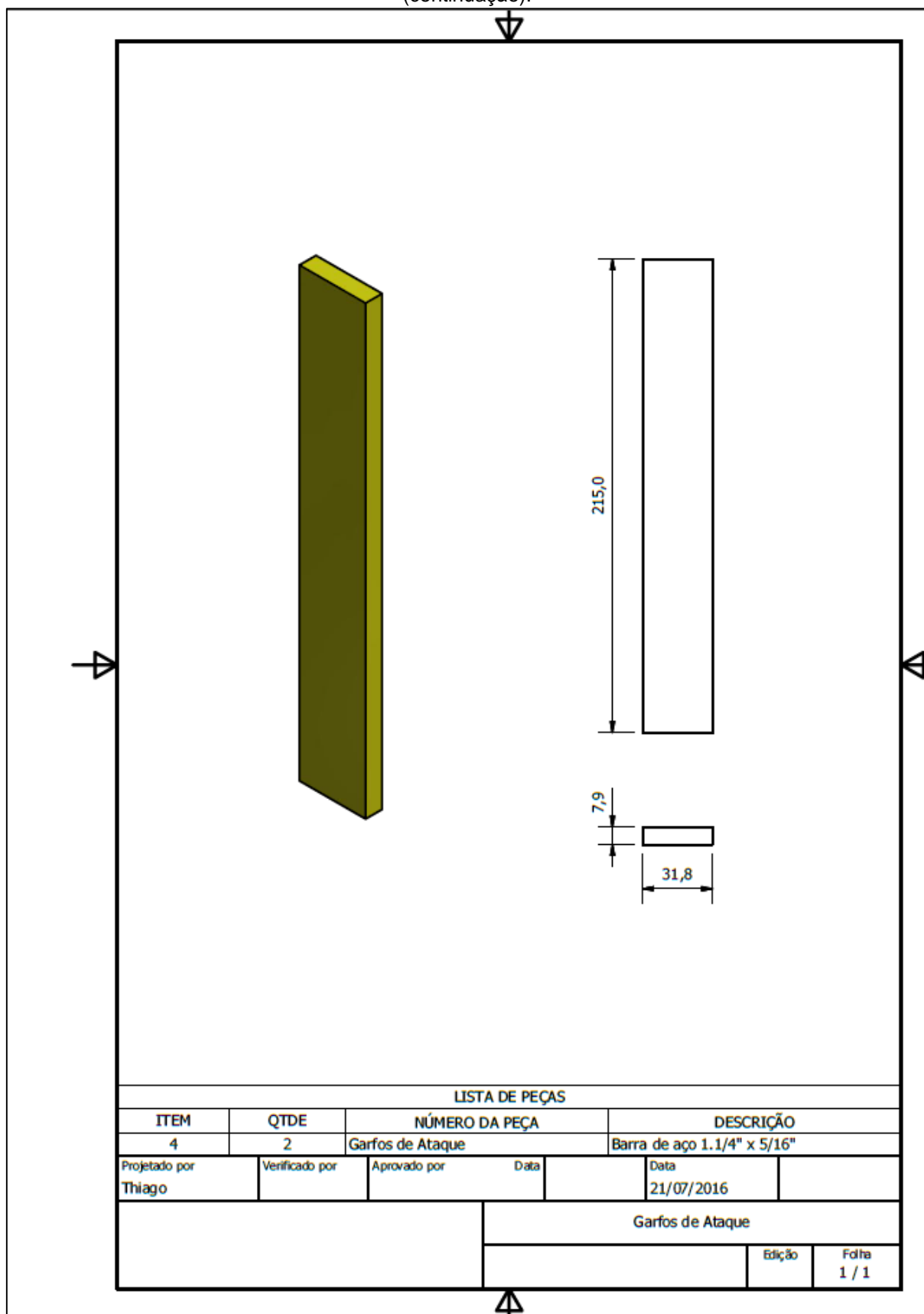




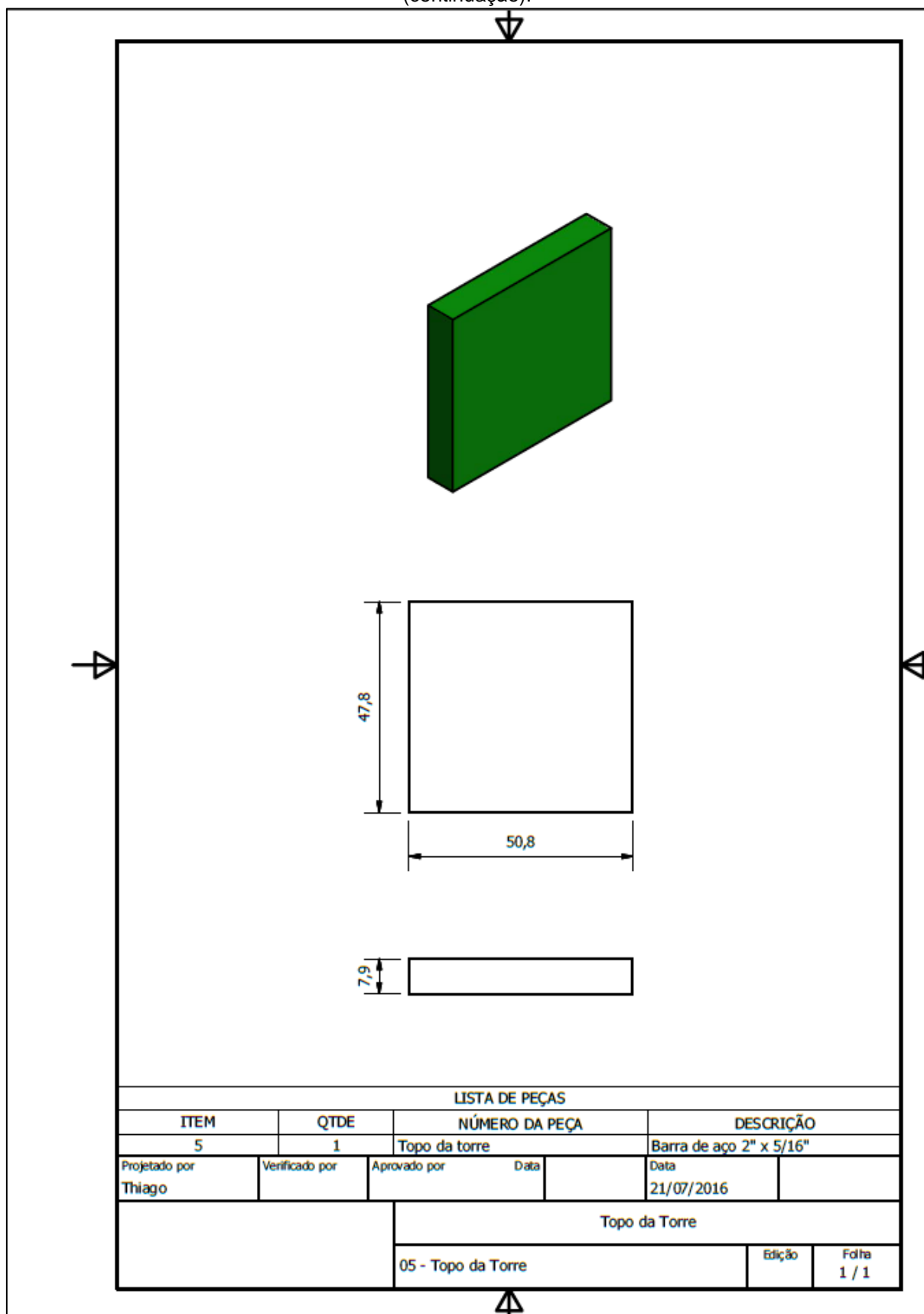
ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar (continuação).



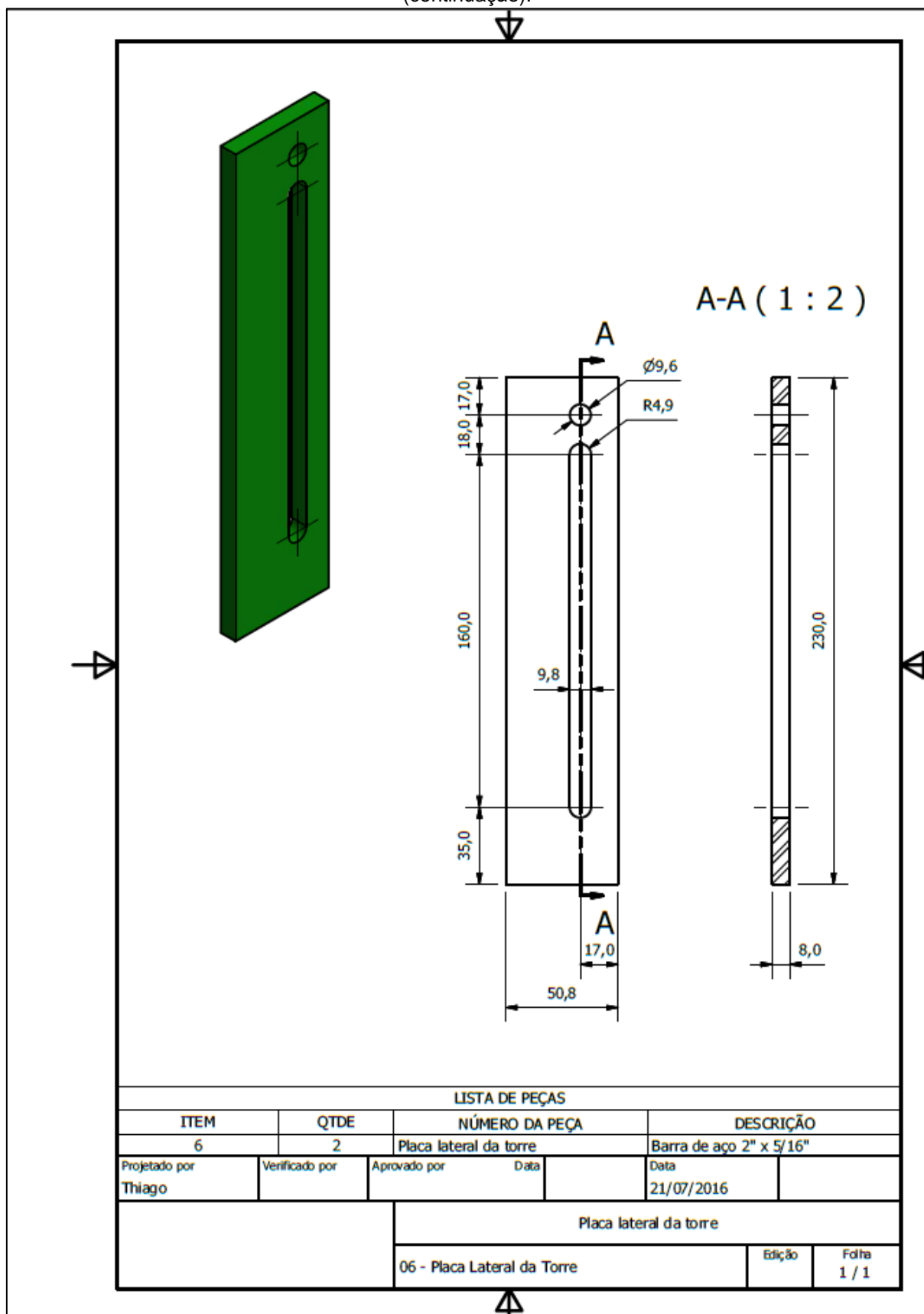
ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar (continuação).



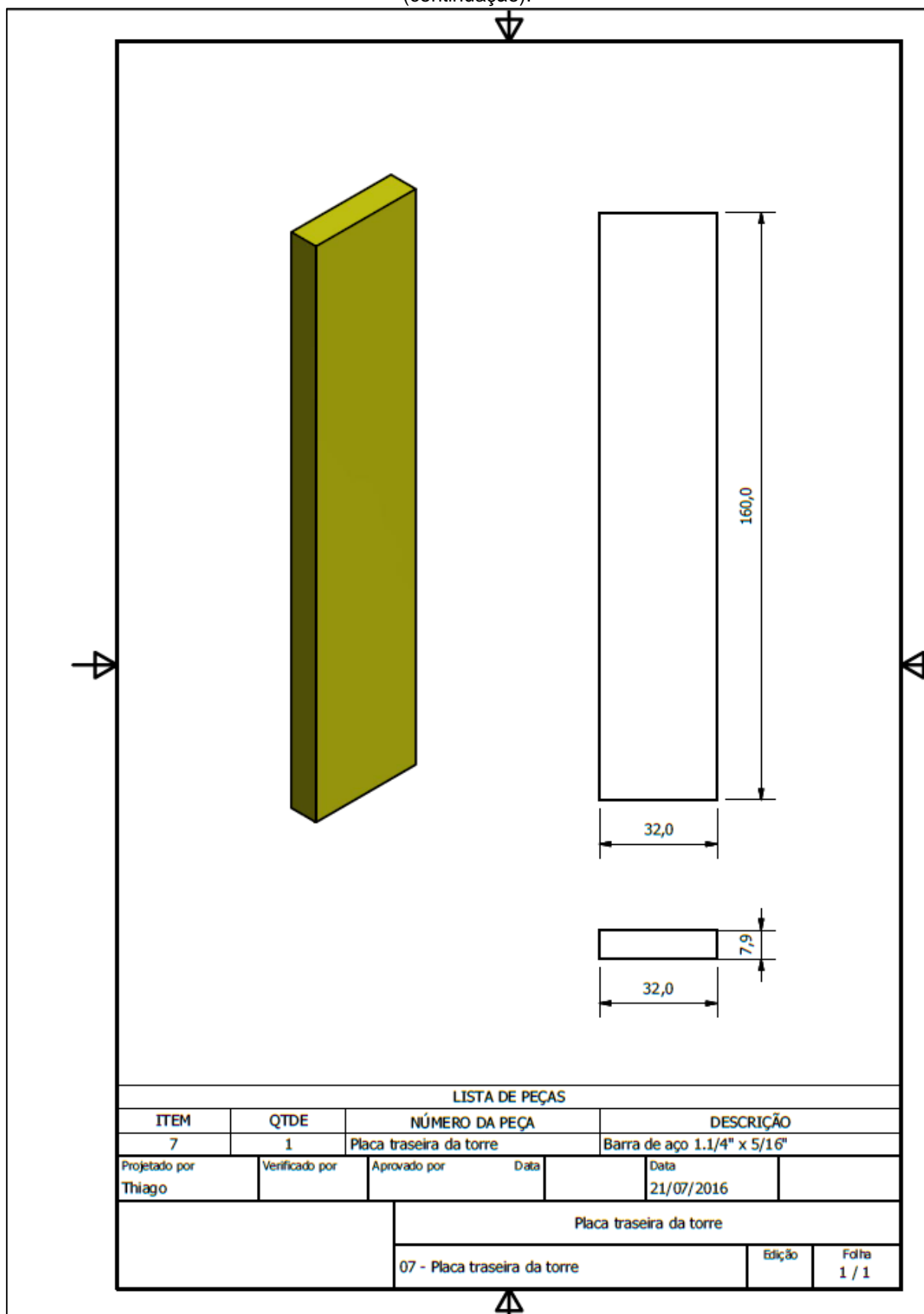
ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar (continuação).



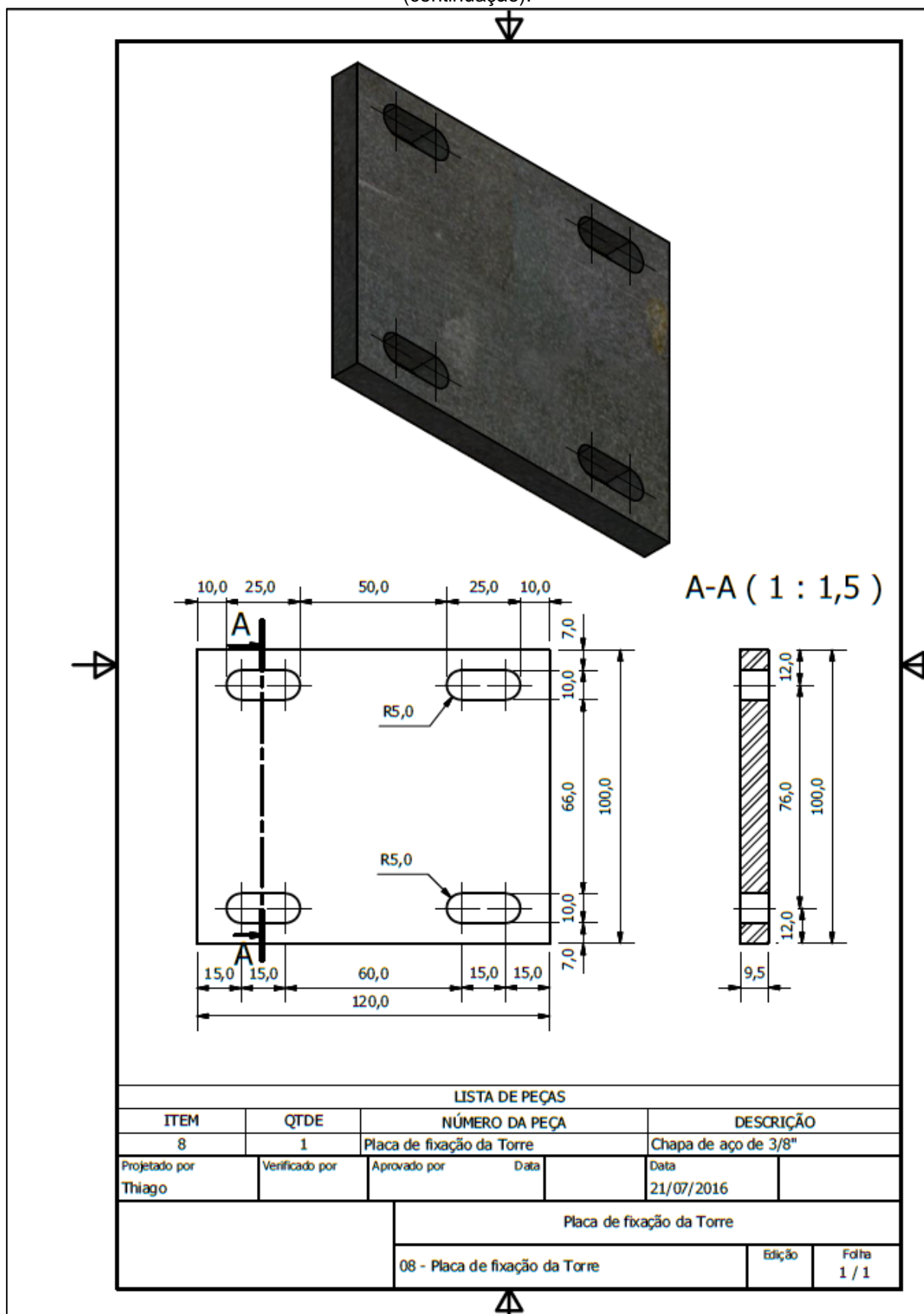
ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar  
(continuação).



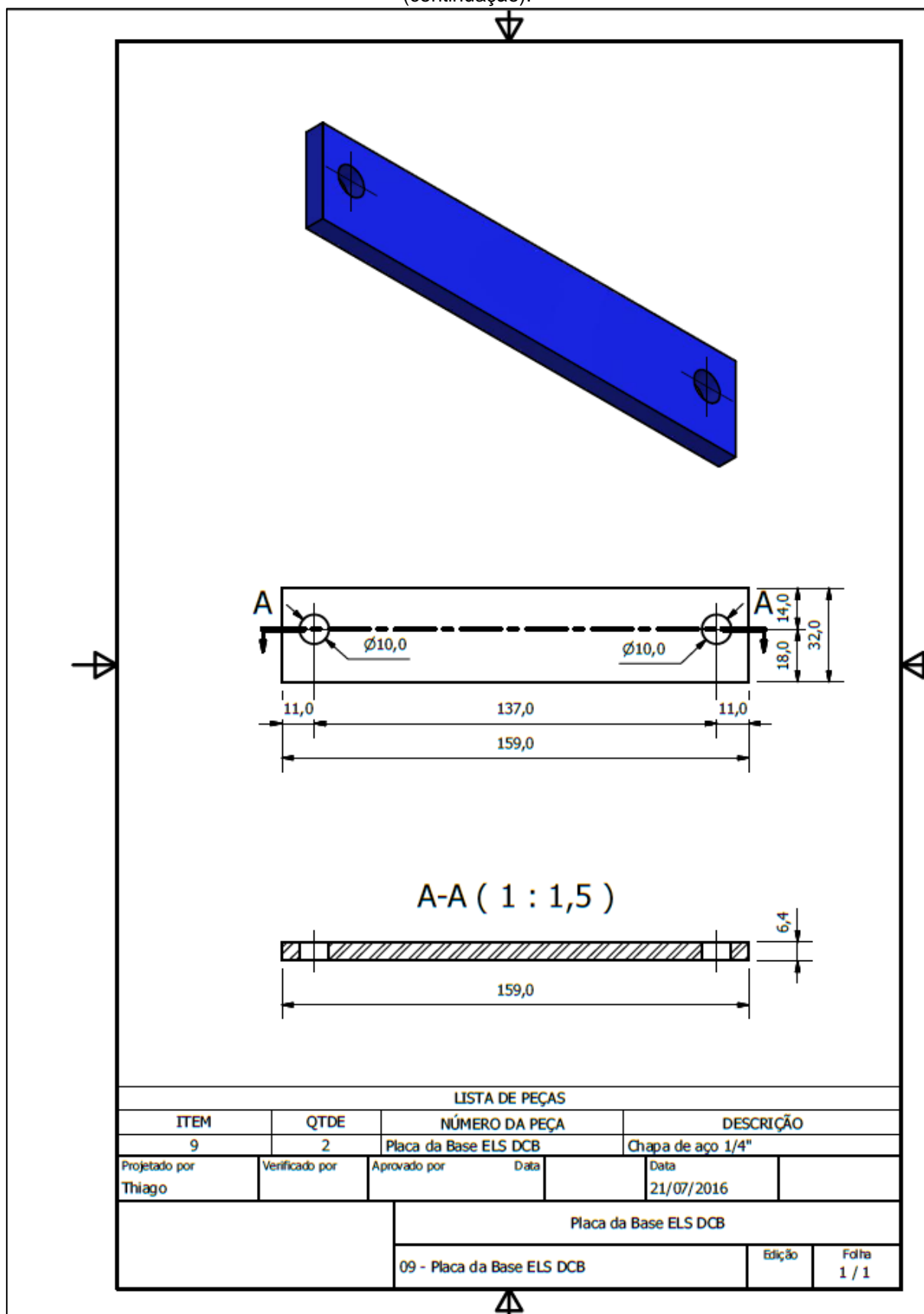
ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar (continuação).



ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar  
(continuação).

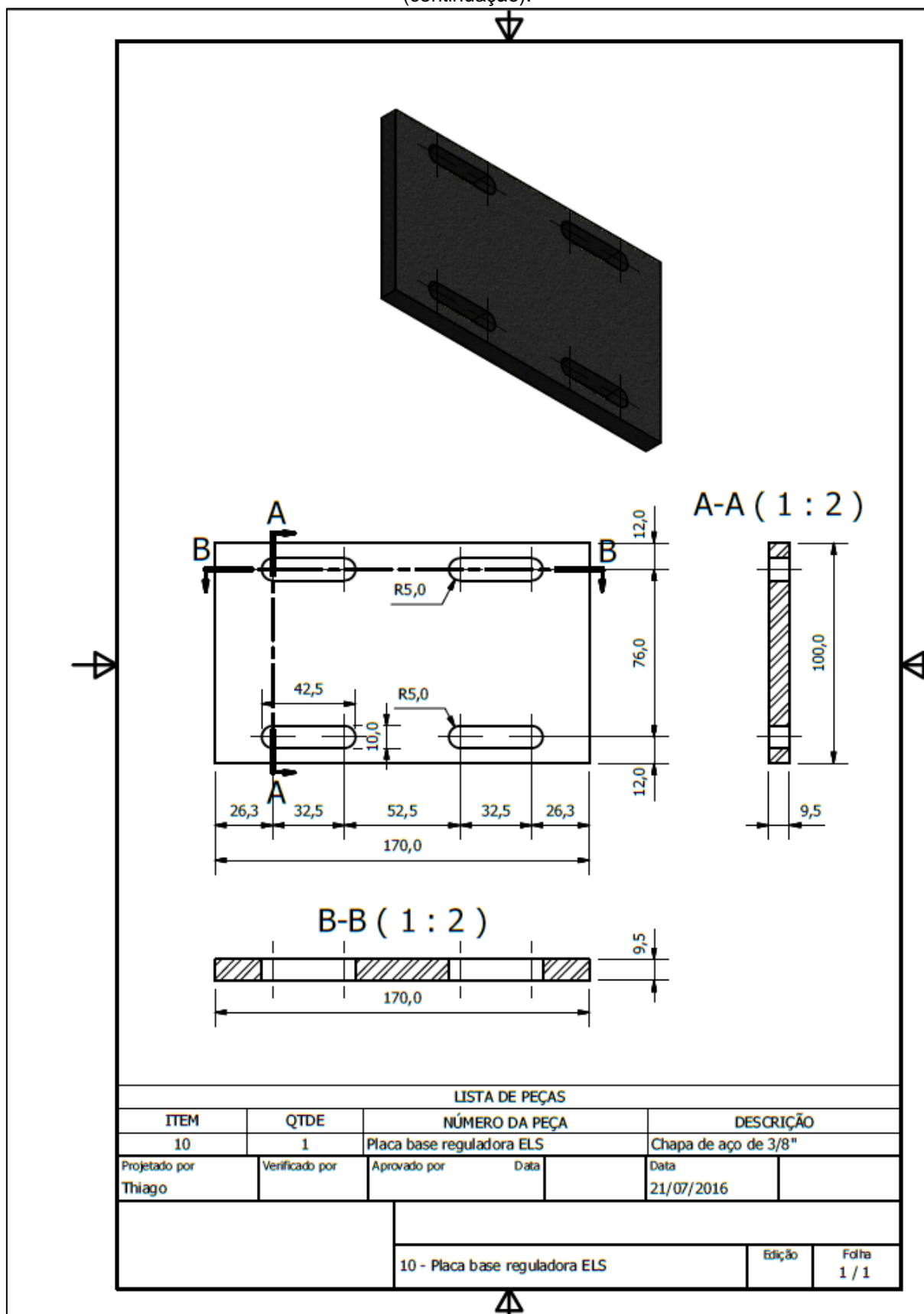


ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar  
(continuação).

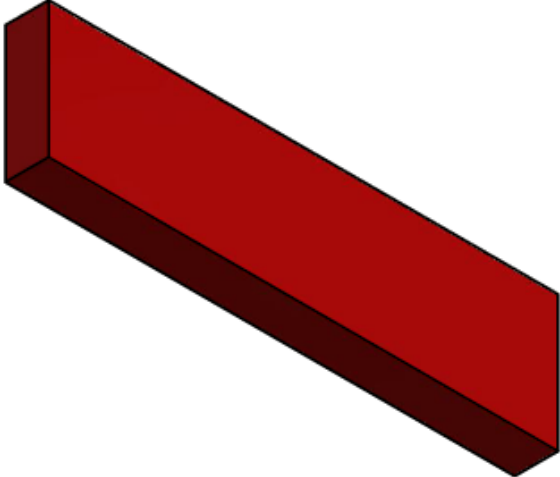

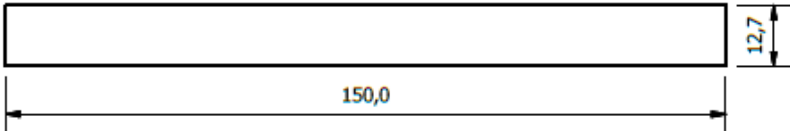




ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar (continuação).

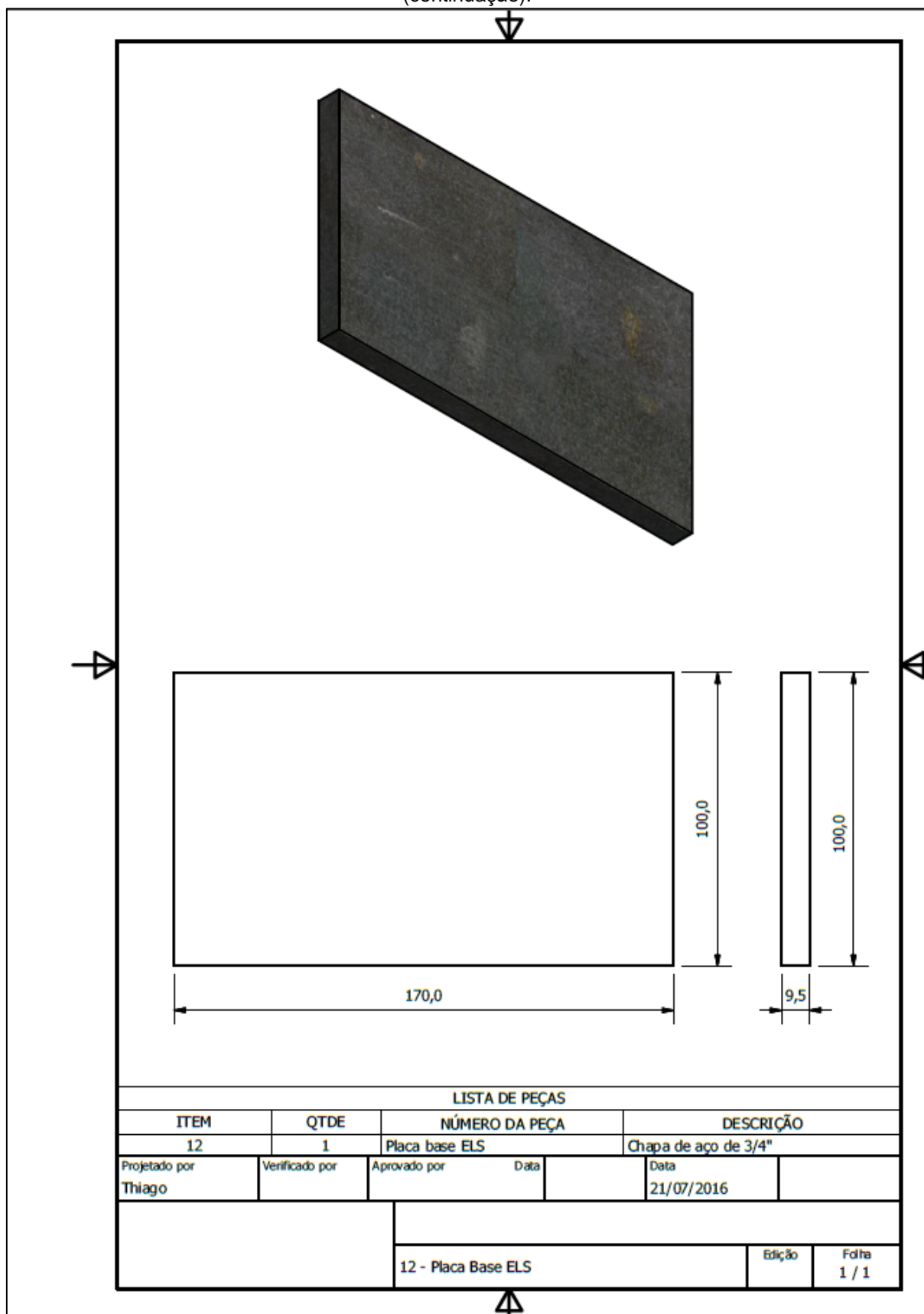


ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar (continuação).

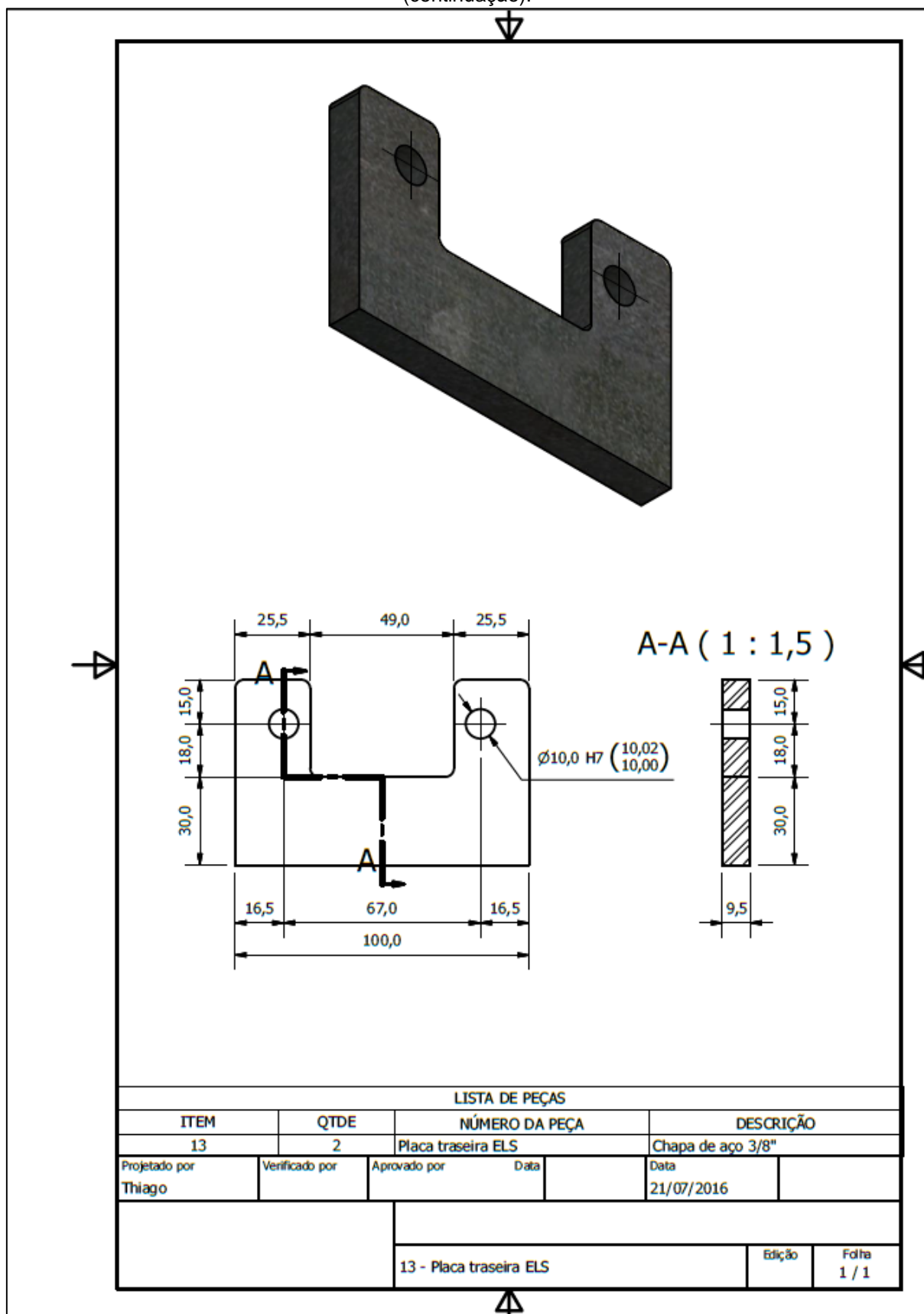




| LISTA DE PEÇAS          |                |                               |      |                   |  |
|-------------------------|----------------|-------------------------------|------|-------------------|--|
| ITEM                    | QTDE           | NÚMERO DA PEÇA                |      | DESCRIÇÃO         |  |
| 11                      | 1              | Suporte do mecanismo ELS      |      | Chapa de aço 3/4" |  |
| Projetado por<br>Thiago | Verificado por | Aprovado por                  | Data | Data              |  |
|                         |                | 21/07/2016                    |      |                   |  |
|                         |                | 11 - Suporte do mecanismo ELS |      |                   |  |
|                         |                | Edição                        |      | Folha             |  |
|                         |                | 1 / 1                         |      | 1 / 1             |  |

ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar (continuação).

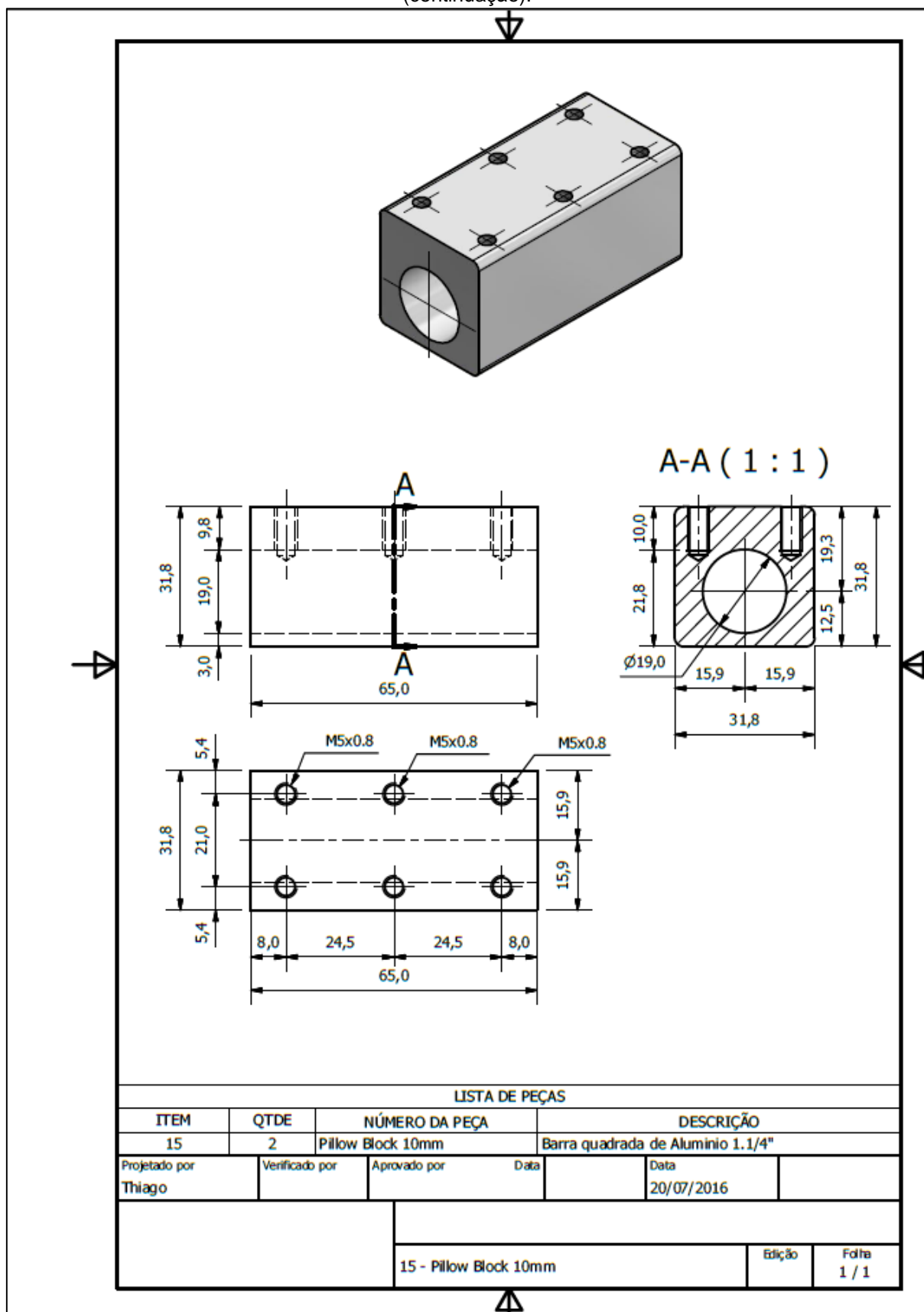


ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar (continuação).





ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar (continuação).

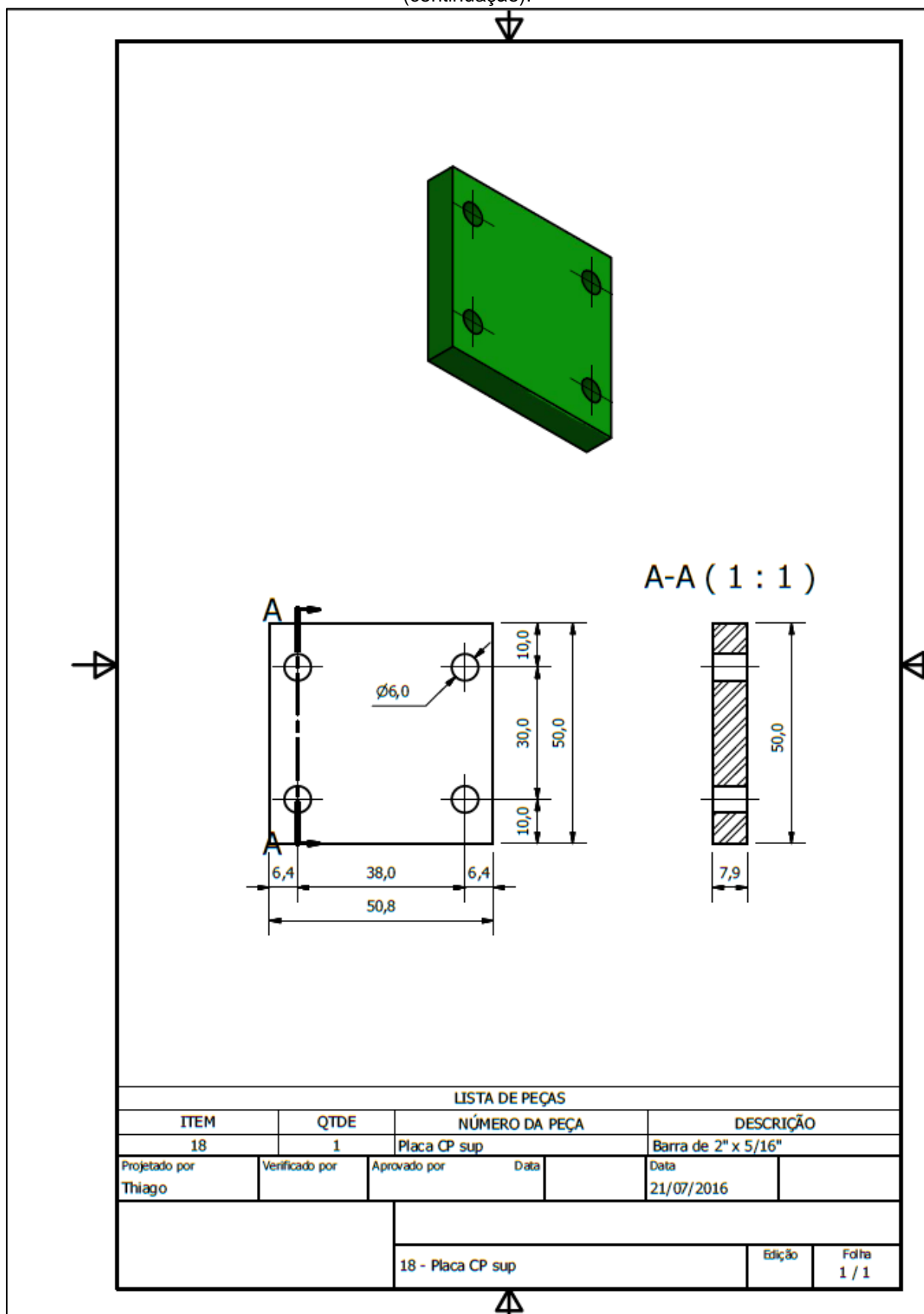




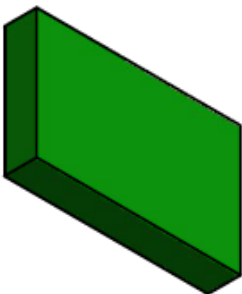
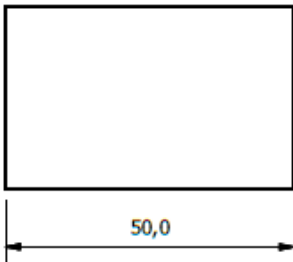
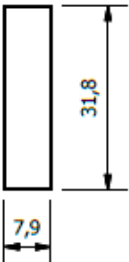




ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar (continuação).



ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar (continuação).

| LISTA DE PEÇAS          |                |                            |      |                                |                |
|-------------------------|----------------|----------------------------|------|--------------------------------|----------------|
| ITEM                    | QTDE           | NÚMERO DA PEÇA             |      | DESCRIÇÃO                      |                |
| 19                      | 1              | Batente do fixador CP      |      | Barra de aço de 1.1/4" x 5/16" |                |
| Projetado por<br>Thiago | Verificado por | Aprovado por               | Data | Data                           |                |
|                         |                |                            |      | 21/07/2016                     |                |
|                         |                | 19 - Batente do fixador CP |      | Edição                         | Folha<br>1 / 1 |

ANEXO B – Projeto detalhado dos dispositivos DCB e ELS para ensaio de fratura interlaminar (continuação).

